



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE
INCENDIOS DE GRAN ESCALA
PRODUCIDOS POR LA COMBUSTIÓN
ESPONTÁNEA EN LOS FRENTES DE
EXPLOTACIÓN EN MINERÍA DE CARBÓN A
CIELO ABIERTO Y DISEÑO DE
ESTRATEGIAS DE APAGADO**

Pablo Bustamante Baena

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas- Departamento de Materiales

Medellín, Colombia

2017

MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE INCENDIOS DE GRAN ESCALA PRODUCIDOS POR LA COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA EN LOS FRENTES DE EXPLOTACIÓN EN MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO Y DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE APAGADO

Pablo Bustamante Baena

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Recursos Minerales

Director:

Ph.D. Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Línea de Investigación:

Explotación y Beneficio

Grupo de Investigación:

Instituto de Minerales CIMEX

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas- Departamento de Materiales

Medellín, Colombia

2017

“No puede existir un lenguaje más universal y simple, más carente de errores y oscuridades, y por lo tanto más apto para expresar las relaciones invariables de las cosas naturales. Las matemáticas parecen constituir una facultad de la mente humana destinada a compensar la brevedad de la vida y la imperfección de los sentidos.”

Joseph Fourier

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión de mi padre, amigo y profesor Moisés Oswaldo Bustamante Rúa, Gracias a la Universidad Nacional de Colombia por brindarme la oportunidad de hacer parte de su historia y me siento muy orgulloso de eso, agradezco a la empresa Cerrejón por su apoyo económico y técnico por parte de los ingenieros de la empresa como Hernán Zapata , Jimmy Varela, Sandro Móscate y Edgardo Pérez por su cálido trato durante los días de visita de campo y por ultimo al Instituto de Minerales CIMEX, mi casa, donde toda su gente me ayudo y me dio consejos en especial a mi gran amigo Alan Daza (compañero de tesis) y Julián Osorio.

A mi madre por ser el apoyo más grande durante mi vida universitaria, a Keyla Álvarez por estar siempre en los momentos difíciles y por sus grandes consejos como mi mejor amiga, pareja y compañera de aventuras.

Resumen

La producción de carbón de Cerrejón es realizada en la Zona Norte del País, específicamente en la península del departamento de La Guajira, abarcando un área aproximada de 78.000 hectáreas. Los carbones del Cerrejón son susceptibles a la combustión espontánea de carbón, ya que al finalizar el año 2.016 se encontraban activos 325 incendios en los tajos abandonado y paredes altas. La combustión espontánea es un tema de gran preocupación, causando problemas ambientales al generar emisiones de gases contaminantes, pérdidas de reservas, problemas de inestabilidad geotécnica y problemas de salud. La propagación de los incendios en paredes finales y tajos abandonados tiene una espontaneidad termodinámica y depende de la cinética química generado por el desencadenamiento progresivo de las reacciones químicas, sumado a una intensa liberación de calor en el frente de reacción pudiéndose estudiar teniendo en cuenta la termodinámica y cinética químicas, que obedecen a la ecuación de conservación de la energía y las especies químicas, respectivamente. Por lo tanto, si el manto de carbón presenta un incendio con una temperatura de 200 °C, la tasa de consumo de carbón es aproximadamente 200 cm³/hora, si el incendio presenta una temperatura de 1.200 °C, la tasa de consumo de carbón es aproximadamente 3.000 cm³/hora; si las fisuras predominan en el macizo rocoso la propagación del incendio sería aproximadamente 17 cm/día, mientras que, si se tienen grietas, la propagación del incendio sería aproximadamente 3,5 cm/día. Se mejoró los métodos de remoción y sofocación, y adicionalmente se planteó como método alternativo llamado PROPEX como una propuesta innovadora de extinción a nivel mundial.

Palabras clave: Combustión espontánea, Carbón, Propagación, Cerrejón, Paredes finales, Termodinámica, Cinética química.

Abstract

The Cerrejón coal production is carried out in the Northern Zone of the Country, specifically in the peninsula of the department of La Guajira, covering an area of approximately 78.000 hectares. Cerrejón coals are susceptible to spontaneous combustion of coal, since at the end of 2.016 there were 325 fires active. Spontaneous combustion is a subject of great concern, causing mainly environmental problems by generating emissions of polluting gases, losses of reserves, problems of geotechnical instability and health problems. The propagation of fires in highwall and footwall is caused by the progressive unleashing of chemical reactions, coupled with an intense release of heat in the reaction front and can be studied taking into account the thermodynamics and chemical kinetics, which are due to the conservation equation of energy and chemical species, respectively. Therefore, if the coal seams present a fire with a temperature of 200 ° C, the rate of consumption of coal is approximately 200 cm³/hour, if the fire has a temperature of 1.200 °C, the rate of consumption of coal is approximately 3.000 cm³ / hour and if the fissure predominate in the rocky mass the fire propagation would be approximately 17 cm/day, whereas if there are cracks, the fire propagation would be approximately 3,5 cm/day. Technical improvements were proposed in the methods of removal, suffocation and the PROPEX proposal as an alternative method of innovative extinction worldwide

Keywords: Spontaneous combustion, Coal, Propagation, Cerrejón, Final walls, Thermodynamics, Chemical kinetics.

Contenido

1.	Introducción	25
2.	Estado del arte.....	29
2.1	Carbón.....	29
2.1.1	Clasificación del carbón.....	31
2.1.2	Clasificación de los carbones de Cerrejón	33
2.2	Combustión espontánea del carbón.....	34
2.2.1	Oxidación del carbón	35
2.2.2	Modelo de combustión espontánea de los incendios de carbón	37
2.3	Cerrejón.....	48
2.3.1	Antecedentes y actualidad de los incendios	51
2.3.2	Impactos de los incendios	56
2.3.3	Procedimiento para la extinción de los incendios	58
3.	Metodología para estudiar la propagación.....	63
3.1	Método de elementos finitos	63
3.2	Ecuaciones de conservación.....	64
3.2.1	Ecuación de la conservación de la energía.....	65
3.2.2	Ecuación de la conservación para especies	66
3.2.3	Ecuación de la conservación de la continuidad.....	66
3.3	Reacciones sólido-fluido.....	67
3.3.1	Reacción química	67
3.3.2	Transferencia de calor	71

4.	Simulación numérica de la propagación.....	77
4.1	Datos experimentales	77
4.2	Geometría.....	78
4.3	Materiales.....	78
4.4	Discretización y generación de malla	80
4.5	Resultados y discusión de la simulación.....	81
4.6	Calculo de la distancia de propagación en campo	94
5.	Método para extinción de los incendios	97
5.1	Remoción.....	97
5.2	Sofocación.....	101
5.2.1	Granulometría y tipo suelo.....	102
5.2.2	Grado de compactación.....	104
5.3	PROPEX	105
5.3.1	Producto	106
5.3.2	Metodología	108
5.3.3	Simulación	113
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	115
6.1	Conclusiones	115
6.2	Recomendaciones	116
7.	Bibliografía.....	119
8.	Anexo 1. Planos de los tajos de la mina Cerrejón con los incendios en 2016.....	127
9.	Anexo 2. COMSOL Multiphysics.....	133
10.	Anexo 3. Proctor	135

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Génesis del carbón en estratos enterrados, relación entre la profundidad y el rango... 29	29
Figura 2-2. Rango de los carbones según su génesis. 30	30
Figura 2-3. Primera figura, corresponde a inertinita y vitrinita en un lignito. Segunda figura, corresponde a vitrinita y liptinita en un carbón bituminoso. 31	31
Figura 2-4. Principales incendios de carbón a nivel mundial producto de la combustión espontánea. 34	34
Figura 2-5. Modelo de combustión de carbón bajo tierra en minería a cielo abierto. 35	35
Figura 2-6. Clasificación de los incendios de carbón por génesis, edad, ubicación y etapa de combustión 38	38
Figura 2-7. Diagrama esquemático del incendio de carbón subterráneo con grietas y fisuras. 1: capa de pizarra, 2: manto de carbón, 3: capa de arenisca, 4: incendio subterráneo de carbón ardiente, 5: cavidad subterránea de pérdida de volumen, 6: capa de ceniza, 7: roca piramórfica, 8: material de sobrecarga colapsado 9: ventilación entrante grieta, 10: grieta, saliente para el gas de escape, 11: fisura, 12: minerales cristalizando en la abertura de la grieta. 39	39
Figura 2-8. (a) Esquema de incendio en superficie del manto de carbón, (b) modelo de transferencias de los gases y el calor en los mantos de carbón. 40	40
Figura 2-9. Modelo del origen del incendio en profundidad del manto de carbón. 40	40
Figura 2-10. (a) Relación de la constante de equilibrio con la temperatura de la propagación del carbón. (b) Relación del %CO con la temperatura de la propagación del incendio. 41	41
Figura 2-11. Etapas del incendio en los tajos de explotación. 42	42

Figura 2-12. Esquema de una zona de combustión espontánea del carbón. Obsérvese la reducción del manto de carbón a una delgada capa de cenizas debido a la combustión y la relación entre la roca sana, la quemada y la fundida.	44
Figura 2-13. Incendio de carbón en una mina abandonada, muestra la emisión de humos a través de grietas y fracturas y la entrada de aire fresco a través de las aberturas y la sobrecarga.....	45
Figura 2-14. Depósito de clinker en la mina Cerrejón.....	46
Figura 2-15. Zona de clinker donde se ve la propagación del incendio hace millones de años, en Tajo 100 de la mina Cerrejón.....	47
Figura 2-16. Los incendios de carbón subterráneo extraídos de ETM + 7 datos de 2001, 2002. (a) los incendios de carbón subterráneo relacionados con anomalías térmicas de 2001; (b) incendios de carbón subterráneo relacionados con anomalías térmicas de 2002.....	48
Figura 2-17. Localización geográfica de Cerrejón en la península de La Guajira.....	49
Figura 2-18. Proceso de producción del carbón en Cerrejón.....	50
Figura 2-19. Remoción de material caliente en la mina Cerrejón.	51
Figura 2-20. (a) Incendio en Cerrejón sobre una vía de paso con maquinaria pesada a los lados. (b) Inventario de los incendios en la mina por parte del grupo del control de incendios.	53
Figura 2-21. Control de incendios del 2016 en Cerrejón, comparado con su totalidad.....	54
Figura 2-22. Incendios controlados por Cerrejón en el 2016.....	55
Figura 2-23. Proyecto del control de incendio de la rampa de Sierra Nevada en el Tajo Oreganal.	56
Figura 2-24. Potenciales impactos generados por la combustión de carbón.....	57
Figura 2-25. Esquemas de difusión a través de lechos poroso en el sofocamiento del incendio, comparando lechos de alta porosidad y de baja porosidad controlados por la distribución de tamaños del sistema particulado usado.	58
Figura 2-26. Trabajo de sofocación realizado por Cerrejón, antes y después.....	60
Figura 2-27. Enfriamiento de manto de carbón en Cerrejón, con la ayuda de un tanquero.....	60

Figura 3-1. Esquema de propagación de los incendios en los mantos de Cerrejón.	63
Figura 3-2. Esquema de mecanismos de transferencia de calor en los mantos de carbón del Cerrejón.	71
Figura 3-3. Aspectos del tratamiento del transporte, reacción y cambio de fase en medios porosos.	74
Figura 3-4. Condición de frontera de Neumann.....	76
Figura 4-1. Geometría seleccionada y geológica utilizada para la simulación.	78
Figura 4-2. Malla de la simulación en COMSOL, primera imagen grilla para simulación de un foco de incendio, segunda imagen simulación para pantalla completa de incendio	81
Figura 4-3. (a) Variación de las concentraciones de carbón, oxígeno y dióxido de carbono con respecto al tiempo (seg). (b) Variación de las concentraciones de carbón, oxígeno y monóxido de carbono con respecto al tiempo (seg).....	82
Figura 4-4. Escala de consumo de carbón dependiendo de las diferentes temperaturas que pueden tener los incendios.....	84
Figura 4-5. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isothermas dentro del cuerpo para 1 mes.	85
Figura 4-6. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isothermas dentro del cuerpo para 6 meses.	86
Figura 4-7. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isothermas dentro del cuerpo para 12 meses.....	87
Figura 4-8. Comportamiento de la distribución de temperaturas dentro del manto en un foco de incendio.....	88
Figura 4-9. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isothermas dentro del cuerpo para 1 mes.	89

Figura 4-10. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isothermas dentro del cuerpo para 6 meses.	90
Figura 4-11. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isothermas dentro del cuerpo para 12 meses.....	91
Figura 4-12. Comportamiento de la distribución de temperaturas dentro del manto en una pantalla de incendio.....	92
Figura 4-13. Tasa de propagación del incendio dependiendo de los valores de los diámetros característicos de las fracturas predominantes en el macizo rocoso.	94
Figura 4-14. Variables por considerar en la distancia del incendio en superficie según los médelos descritos.	95
Figura 5-1. Vista lateral de la retroexcavadora brazo largo con adaptación de sistema de enfriamiento.....	98
Figura 5-2. Vista isométrica de la retroexcavadora brazo largo con adaptación de sistema de enfriamiento.....	99
Figura 5-3. Cuchara con adaptación de boquilla nebulizadora.....	100
Figura 5-4. Temperatura vs tiempo de aplicación de agua en el incendio.....	101
Figura 5-5. Fracción de pasante acumulado vs tamaño de grano.....	102
Figura 5-6. Masa unitaria máxima seca.....	105
Figura 5-7. (a) esquema de agente espumante, manguera de succión y dosificador. (b) Compresor de nitrógeno y generador de espuma.....	106
Figura 5-8. Espuma preparada para la extinción de los incendios a gran escala.....	107
Figura 5-9. Esquema general de la perforación para la propuesta PROPEX. (1) Perforadora (2) Pozo de inyección de espuma trifásica.....	109
Figura 5-10. Perforaciones de sondeo para la determinación de las zonas de influencia del incendio.....	110

Figura 5-11. Esquema general de la inyección para la propuesta PROPEX. (1) Tanque de almacenamiento de nitrógeno (2) dosificador de agente espumante (3) tanque de agitación para la preparación de la suspensión (4) tanque de mezcla final de la espuma trifásica (5) compresor de aire (6) bomba de presión de lodos (7) cabeza de inyección (8) tubo de revestimiento.	112
Figura 5-12. Tecnología Wireline implementada en pozos de perforación.	113
Figura 5-13. Efecto de la transferencia de calor después de la aplicación del PROPEX.....	114
Figura 9-1. Módulos de COMSOL multhyphiscs.	134

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Clasificación ASTM del carbón.	32
Tabla 2-2. Calidades de los carbones de Cerrejón.	33
Tabla 2-3. Resultados de análisis petrográfico para carbones de Cerrejón para 14 muestras.....	33
Tabla 2-4. Control de incendios en mantos de Cerrejón.	55
Tabla 2-5. Métodos actuales para el control de incendios y oportunidades de mejora.	61
Tabla 4-1. Valores de velocidades de propagación medidos en Cerrejón.....	77
Tabla 4-2. Ensayos de laboratorio para determinar la tasa de combustión de carbón.....	78
Tabla 4-3. Parámetros termodinámicos utilizados en las simulaciones de COMSOL.....	79
Tabla 4-4. Asociación entre los campos de velocidades y los diámetros de fracturas en las paredes.	93
Tabla 4-5. Ecuaciones para el cálculo de la distancia de propagación del incendio en superficie según el tipo de fractura.	95
Tabla 5-1. Parámetros para la aplicación de agua en los frentes incendiados.....	101
Tabla 5-2. Clasificación USCS para las diferentes muestras de estudio.....	103
Tabla 5-3. Criterios de evaluación utilizados para la aplicación del método de ponderación por puntos.....	103
Tabla 5-4. Resultados de la ponderación por puntos para cada una de las muestras de suelo.	104
Tabla 5-5. Condiciones óptimas de funcionamiento del sistema de formación de espuma.	107

Tabla 5-6. Parámetros técnicos para la aplicación de la espuma trifásica.....	108
Tabla 5-7. Diámetro nominal de revestimiento y diámetro de perforación.	111

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Significado
A	Factor de frecuencia	-
Btu	British thermal unit	Energía
$^{\circ}C$	Grados centígrados	Temperatura
C	Concentración de especies	Concentración
cm	Centímetro(s)	Distancia
c_p	Capacidad calorífica a presión constante	-
Di	Distancia desde el frente hasta el incendio en superficie	Distancia
Ea	Energía de activación	Energía
g	Gravedad	Gravedad
H	Entalpia	Calor
H	Flujo de energía	Energía
J	Joule	Energía
J	Tasa de difusión de las especies	Velocidad
K	Kelvin	Temperatura

K	Constante de equilibrio	-
k	Constante de reacciones químicas	Velocidad
kg	Kilogramo(s)	Peso
km	Kilometro(s)	Distancia
L	Litro(s)	Volumen
m	Metro(s)	Distancia
mol	Mol(s)	Concentración
N	Moles i formados	Cantidad molar
Pa	Pascal(s)	Presión
q	Fuente de calor	Calor
r	Velocidad de reacción	Velocidad
R	Constante de los gases	Constante
s	Segundo(s)	Tiempo
t	Tiempo	Tiempo
T_i	Temperatura del manto	Temperatura
ton	Tonelada(s)	Peso
u	Energía interna	Energía
u	Campo de velocidad en medio poroso	Velocidad
V	Velocidad del sistema	Velocidad
W	Watt(s)	Energía por unidad de tiempo

Símbolos con letras griegas

Símbolo Término

θ	Porosidad
τ	Fuerzas viscosas
ρ	Densidad
∇	Gradiente
\emptyset	Buzamiento del manto de carbón

Subíndices

Subíndice Término

i	i ésimo valor
n	Ultimo valor de la serie
j	j ésimo valor
b	Boltzmann
f	Fluido
s	Solido

Superíndices

Subíndice Término

m mezcla

ν coeficiente estequiométrico

1. Introducción

La combustión espontánea o autocombustión del carbón es un fenómeno, que ocurre naturalmente durante la oxidación del carbón al exponerse a condiciones atmosféricas bajo condiciones de procesos de erosión, geológicos y por las prácticas mineras a cielo abierto y subterráneas (Heffern & Coates, 2004; Kuenzer & Stracher, 2012; X. Lu et al., 2015; R. V. K. Singh, 2013). Bajo las condiciones apropiadas la oxidación natural “*in situ*” se acelera rápidamente, iniciando el autocalentamiento y posteriormente la combustión espontánea, desencadenando la propagación en los mantos de carbón.

La combustión espontánea es un tema de gran preocupación en las minas de carbón del mundo, ya que provoca problemas ambientales, al generar emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, pérdidas económicas por el consumo de las reservas (Quintero, Candela, Ríos, Montes, & Uribe, 2009b), problemas de inestabilidad debido a la afectación geotécnica del macizo rocoso (Díaz, Fernández, Ordóñez, Canto, & González, 2012) y problemas de salud público por la cercanía con comunidades (Finkelman, 2004), en el caso de Cerrejón con comunidades Wayuu y población guajira.

El origen de la combustión espontánea se puede explicar a partir de una secuencia de reacciones químicas y a procesos de oxidación en la superficie del carbón, ayudado de factores tales como los geológicos, estructurales, tipos de forestación cercana, cercanías a costas, mineralogía, composición, humedad relativa del aire, composición interna del carbón, etc. (Gangopadhyay & Lahiri-Dutt, 2005; W. Lu, Cao, & Tien, 2017; Moxon & Richardson, 1985; Nunes & Marcilio, 2015; Pone et al., 2007). A lo largo de la historia se han reportado los casos más críticos de combustión espontánea a nivel mundial en minería hasta la actualidad, en lugares donde la producción de carbón es significativa (ver Figura 2-4).

Cerrejón es un complejo que se encuentra en el norte de Colombia y durante la explotación ha sido afectado por el fenómeno de combustión espontáneas de carbón, y aunque se ha demostrado que los incendios existen desde antes de las actividades mineras por la presencia de un estrato de una calcina que se configura como trazador, denominado en la mina como “clinker” (Departamento de Geología, 2017) y de aquí en adelante se seguirá llamando así. Según los estudios que se han adelantado en la empresa, se ha consumido aproximadamente 2,6 Mton de carbón en la mina producto de los

incendios, invirtiendo aproximadamente 1,3 millones de dólares anuales para su control y extinción (Quintero et al., 2009b).

Actualmente, Cerrejón actúa con medidas tanto preventivas como correctivas para el control de los incendios. En este sentido, el proceso preventivo general de prevención consiste en:

- Identificación de los mantos que según la secuencia minera quedarán expuestos al ambiente.
- Realizan sellamientos de los mantos con “Bitumen” cuando estos presentan alturas menores a 10 metros, y realizan seguimiento periódico de dichos mantos. El Bitumen, también conocido como emulsión asfáltica es una mezcla compleja de hidrocarburos de petróleo y agua. Se trata de un producto líquido de color café oscuro a negro, de olor dulce y de carácter ácido.
- Seguimiento periódico de los mantos intervenidos por medio de los ingenieros de la mina, este procedimiento se realiza semanal o mensualmente, según la capacidad del personal en cada tajo. El proceso consiste en evaluar la consistencia de los mantos sellados por medio de métodos visuales y destructivos del bitumen.

El proceso de extinción hace alusión a la remoción y enfriamiento de material caliente con retroexcavadoras de brazo largo (ver Figura 2-19), tractor de oruga, equipo de cargue y con material estéril o agua, respectivamente (ver Figura 2-20). El proceso consiste en lo siguiente:

- Identificación de los mantos incendiados, producto de los censos que se hacen por el grupo de control de incendio de la compañía (ver Anexo 1).
- En el caso de que los incendios sean incipientes o de mediana magnitud se interviene con la retroexcavadora de brazo largo o el tractor de oruga, si el incendio es de una magnitud mayor se realiza por medio de sofocación o enfriamiento con material estéril.
- Seguimiento periódico de los mantos intervenidos por medio de los ingenieros de la mina, este procedimiento se realiza semanal o mensualmente, según la capacidad del personal en cada tajo. El proceso consiste en el registro de temperatura con pistola térmica o cámara termográfica.

Esta tesis tiene como objetivo la formulación de una correlación de las variables propias del carbón con las variables del macizo rocoso, con lo que se explica la propagación de los incendios producto de la combustión espontánea de carbón en paredes finales y tajos abandonados orientados a proponer

un método para la extinción, por medio de la determinación de las variables que inciden en la propagación de los incendios, explicar el comportamiento del incendio a medida que se propaga en el manto desde un punto de vista físico-químico y termodinámico y generar una estrategia desde la viabilidad técnica para extinguir los incendios en Cerrejón.

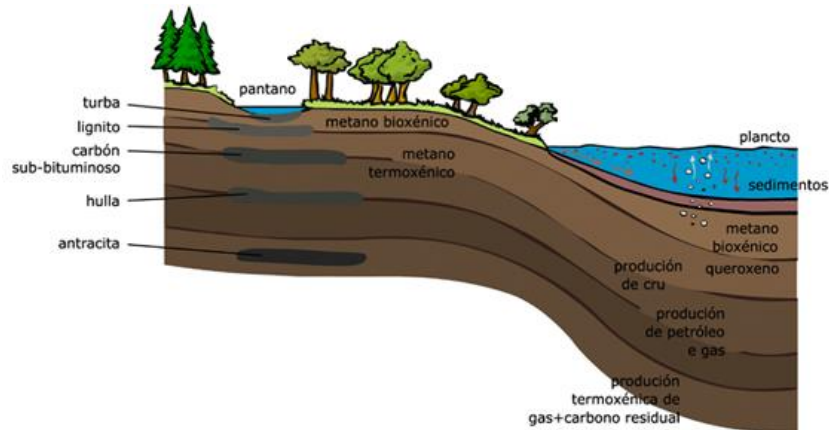
Para la empresa Cerrejón y para las investigaciones futuras asociadas al tema de propagación de incendios, se hace de vital importancia conocer la metodología óptima de extinción de los incendios de pequeña, mediana y gran magnitud para acabar con un problema que pone en riesgo la operación minera desde un ámbito legal, ambiental y financiero. La diferencia de esta investigación con respecto a otras es la producción intelectual del conocimiento sobre los incendios en paredes altas y tajos abandonados porque la literatura se centra en los incendios producidos en pilas y patios de almacenamiento, y muy poco en el fenómeno de propagación en lugares donde no se tiene fácil acceso, siendo una gran limitante para la investigación. La estructura de este estudio es la suma de investigaciones hechas en campo, revisiones bibliográficas a nivel mundial y ensayos de laboratorio que alimentan hipótesis, modelos y conclusiones, generados por la experiencia, tanto de los ingenieros de la empresa Cerrejón como los ingenieros de la Universidad Nacional de Colombia.

2. Estado del arte

2.1 Carbón

El carbón es el producto del enterramiento prehistórico de material vegetal que se acumula por millones de años bajo las capas de la tierra (ver Figura 2-1). El material vegetal cambia su composición física y química y se transforma en carbón. Se dice que la formación de carbón se produce después de los 400 millones de años al someterse a condiciones de tiempo, presión y temperatura. El carbón más prematuro se llama turba, seguido del lignito, después se transforma a sub-bituminoso, posteriormente cambia a bituminoso y por último antracítico (World Coal Institute, 2016).

Figura 2-1. Génesis del carbón en estratos enterrados, relación entre la profundidad y el rango.

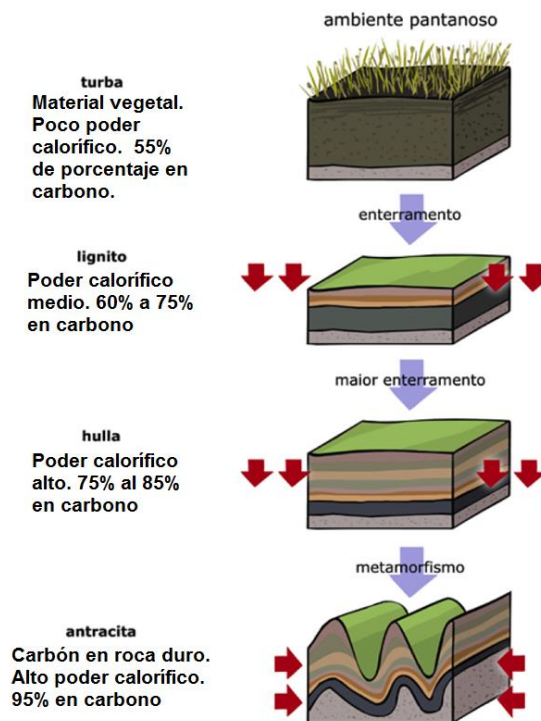


Autor: (Viswanathan & Viswanathan, 2017)

El grado de transformación de la materia orgánica a través de la serie turba, lignito, carbones sub-bituminosos, bituminosos y antracita se desarrolla de forma natural y se conoce como carbonificación (Blandón Montes, 2015). Esta se produce por la conjugación de múltiples variables como es el caso de la temperatura, ya que aumenta la cinética de las reacciones químicas de transformación del carbón, la presión ayuda a reducir la porosidad y la humedad superficial mediante la compactación y el tiempo en el tipo de carbón producido. El grado del carbón mejora a medida que madura de turba a antracita, como se observa en la Figura 2-2, teniendo un efecto notable en sus propiedades físicas y químicas. Los carbones de bajo rango son típicamente materiales más blandos y friables, con aspecto terroso y se caracterizan por un bajo contenido de carbono. Los carbones de mayor rango suelen ser más duros y más fuertes y a menudo tienen un brillo vítreo negro (Smoot,

1993). A medida que aumenta el rango del carbón, la humedad disminuye mejorando sus cualidades termodinámicas aplicadas a la industria.

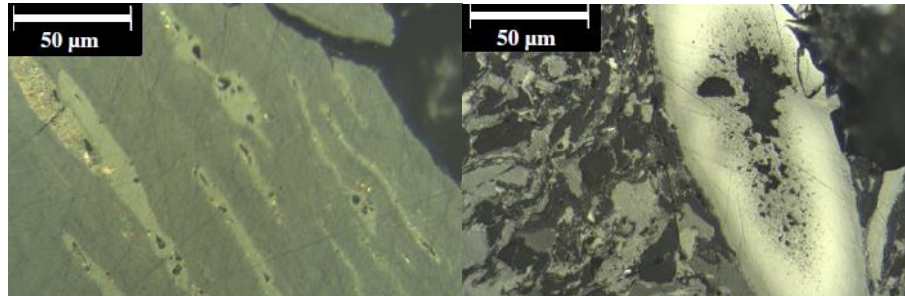
Figura 2-2. Rango de los carbones según su génesis.



Autor: (World Coal Institute, 2016)

El carbón es un material compuesto por una fracción orgánica denominada macerales (Cort, 1978), dichos macerales es la transformación de hojas, tallos y celulosa natural de la materia vegetal pre-existente y también por minerales que se encuentran en menor cantidad, como la pirita, cuarzo, caolinita e illita (Quintero et al., 2009b). El Comité Internacional de Petrografía del Carbón, ICCP (1994 y 2001), los ha clasificado en tres grupos Vitrinitas/Huminitas, Liptinitas/Exinitas e Inertinitas (ver Figura 2-3), los macerales se distinguen microscópicamente por la forma, tamaño, estructura, color, relieve, poder reflector, anisotropía, dureza y fluorescencia (Chen, Mastalerz, & Schimmelmann, 2012; Gómez Rojas, Carmona Lopez, & Bustamante Rúa, 2007).

Figura 2-3. Primera figura, corresponde a inertinita y vitrinita en un lignito. Segunda figura, corresponde a vitrinita y liptinita en un carbón bituminoso.



Autor: (Chen et al., 2012)

2.1.1 Clasificación del carbón

Los carbones son clasificados para definir su rendimiento en sus utilizaciones en determinadas áreas o aplicaciones y, por tanto, para establecer sus precios de comercialización. Hasta el siglo XIX, las clasificaciones se efectuaban en función de las apariencias visuales: carbones brillantes, negros, marrones, lampantes por llama corta, por llama larga, etc. El incremento en los usos industriales hizo necesaria una clasificación más detallada, por lo que se han desarrollado numerosos sistemas basados en combinaciones de las características visuales y microscópicas, así como las propiedades físicas y químicas. (Cort, 1978).

Clasificación A.S.T.M.

La clasificación de carbones de alto rango se realiza en base al carbono fijo, para material volátil menor o igual al 31 % en base seca, exenta de cenizas. Por otro lado, se tiene que los rangos inferiores se clasifican teniendo en cuenta el poder calorífico en base húmeda, exenta de cenizas. Es importante considerar que para los carbones bituminosos y sub-bituminoso, se produce un solapamiento, el cual se resuelve considerando las propiedades aglomerantes y de desmenuzable (ver Tabla 2-1)

32 Determinación y simulación de factores involucrados en la explotación de carbón que promueven la propagación de incendios en los tajos en la mina Cerrejón

Tabla 2-1. Clasificación ASTM del carbón.

Clase/Grupo	Límites Fijos de Carbono (% dmmf)	Límites de Material Volátil (% dmmf)	Valor Calorífico Bruto (BTU/Lb)	Características aglomerantes
Antracita				
1. Meta-antracita	>98	<2	...	No aglomerante
2. Antracita	92-98	02-08	...	
3. Semiantracita	86-92	08-14	...	
Bituminosos				
1. Bajo en Volátiles	78-80	14-22	...	Aglomerante
2. Medio en Volátiles	69-78	22-32	...	
3. Alto en Volátiles A	<69	>31	>14000	No aglomerante
4. Alto en Volátiles B	...	...	13000-14000	
5. Alto en Volátiles C	...	...	11500-15000	
Sub-bituminosos				
1. Sub-bituminosos A	...	...	10500-11500	No aglomerante
2. Sub-bituminosos B	...	...	9500-10500	
3. Sub-bituminosos C	...	...	8300-9500	
Lignito				
1. Lignito A	...	...	6300-8300	No aglomerante
2. Lignito B	...	...	<6300	

Autor: (Berranco Melendez, 2011)

Otras clasificaciones.

Existen varios sistemas de clasificación de carbones, dentro de los cuales se encuentra el Sistema Internacional de Clasificación, el cual se basa en algunas propiedades como el contenido de material volátil, de aglomeración y coquizantes, el cual clasifica los carbones en 15 clases y asigna un código de acuerdo a dichas propiedades (P. Singh, 2014).

Por otro lado, se encuentra también el sistema de clasificación del Reino Unido, el cual se compone de 9 clases, donde las cuatro primeras divisiones se basan exclusivamente en el contenido en materia

volátil (códigos 100, 200 y 300 para contenidos inferiores al 32 %), y las restantes basadas en las propiedades aglomerantes y coquizables (Cort, 1978).

2.1.2 Clasificación de los carbones de Cerrejón

El depósito de Cerrejón se divide en tres bloques, Norte, Central y Sur. El bloque del norte cubre un área de 380 km² con cerca de 55 mantos y contiene el carbón de la fila bituminosa alto en volátiles B según el sistema de clasificación de carbón ASTM. El bloque central se extiende sobre 100 km² con 30 mantos. El bloque sur cubre un área de 200 km² con al menos 15 mantos (Berranco Melendez, 2011). La calidad de los carbones se puede ver en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Calidades de los carbones de Cerrejón.

Propiedades del carbón	Cerrejón		
	Norte	Central	Sur
Valor de Calentamiento (MJ/kg)	26,9-28,5	27,4-28,4	28,2
Humedad (% w)	8,3-10,3	10,0-12,0	11,0
Volátiles (% w)	31,5-36,5	35,0-37,0	36,6
Ceniza (% w)	5,5-11,5	5,0-7,0	4,5
Sulfuros (% w)	0,4-0,8	0,6-0,8	0,5

Autor: (Berranco Melendez, 2011; Cerrejón, 2016a)

Los análisis petrográficos para 14 muestras de los carbones de Cerrejón se muestran en la Tabla 2-3, en los cuales se tienen los porcentajes de macerales. Estos resultados reflejan en general una tendencia, donde el maceral de mayor abundancia es la vitrinita, seguido de la inertinita y por último se tiene la liptinita. La presencia de un mayor contenido de inertinita por encima de liptinita, se puede deducir a partir del hecho de que los carbones de Cerrejón presentan características de rangos intermedios a altos.

Tabla 2-3. Resultados de análisis petrográfico para carbones de Cerrejón para 14 muestras.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14
Vitrinita (%)	70	56	63	66	63	65	57	75	58	57	75	62	52	50
Liptinita (%)	11	8	11	9	9	7	13	8	11	13	10	13	15	12
Inertinita (%)	19	36	26	25	28	28	30	18	31	30	15	25	33	38

Autor: elaboración propia.

2.2 Combustión espontánea del carbón

La combustión espontánea es un proceso que ocurre en la naturaleza por la oxidación del carbón cuando es expuesto por la actividad minera o procesos geológicos. Bajo las condiciones apropiadas la oxidación natural se acelera rápidamente, iniciando el autocalentamiento y posteriormente la liberación de calor, desencadenando la propagación en los mantos de carbón (Angel & Herrera, 2004). La combustión espontánea es un tema de gran preocupación en las minas de carbón en el mundo (ver Figura 2-4) ya que se presenta en muchos países donde la explotación de carbón es alta, provocando principalmente problemas ambientales al generar emisiones de gases contaminantes, pérdida de dinero por el consumo de las reservas y problemas de inestabilidad debido a la afectación geotécnica de los macizos rocosos (ver Figura 2-24).

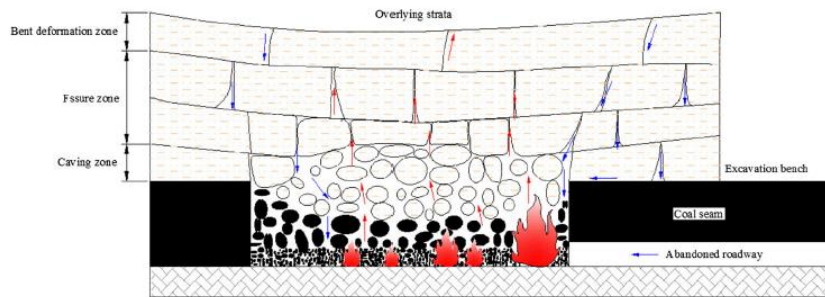
Figura 2-4. Principales incendios de carbón a nivel mundial producto de la combustión espontánea.



Autor: (Melody & Johnston, 2015)

En la Figura 2-5 se muestra como se genera el incendio bajo tierra en minas a cielo abierto que están sometidos a presiones de sobrecarga y a fallas mecánicas inducidas por la pérdida de volumen por la capa de ceniza que se forma, generando erosión y hundimientos del terreno. El hundimiento genera fisuras y grietas en los estratos suprayacente al incendio. Lu et al (2015) clasifican los estratos suprayacentes en 3 zonas de deformación, la primera es la zona de deformación, zona de fisuras y grietas y zona de caverna. A medida que los mantos de carbón se explotan a lo largo del banco, los incendios se convierten en violentos por el ingreso de mayor cantidad de oxígeno en el frente (Song, Zhu, Tan, Wang, & Qin, 2014).

Figura 2-5. Modelo de combustión de carbón bajo tierra en minería a cielo abierto.



Autor: (X. Lu et al., 2015)

Los incendios en los frentes de explotación tienen las siguientes características:

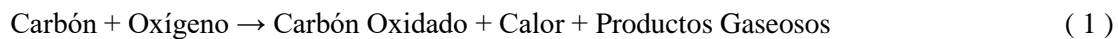
- Los mantos de carbón están expuestos a poca profundidad, donde se pueden observar la expulsión de los gases de combustión en la atmósfera por lo tanto el volumen de fuga de aire a la zona de fuego aumenta bruscamente con los estratos supra yacente.
- La fuente de incendio es difícil de predecir su localización ya que se tiene varios focos de incendios en la extensión del frente de explotación, esto aumentando la dificultad del control de los incendios en las minas a cielo abierto.
- Los hogares de los incendios pueden estar tanto en superficie como en subterráneo, por lo que se tiene que tener sumo cuidado a la hora de categorizar un incendio.

2.2.1 Oxidación del carbón

La oxidación del carbón es fundamentalmente un proceso que ocurre en la interface solido-gas del carbón con el aire y se define como la interacción química que el oxígeno presenta con las moléculas de carbón para producir óxidos que a su vez generan calor por ser este proceso fuertemente exotérmica. La oxidación comienza cuando la superficie fresca queda expuesta por diferentes procesos tales como:

- La explotación minera directamente en el arranque por voladuras y de las palas.
- Presencia de estructuras geológicas como fallas o cabalgamientos, diaclasas y demás fracturas del macizo rocoso
- Erosión de taludes que forman parte de paredes finales y exposición de áreas debido a la caída de rocas en los frentes por el efecto de la voladura.

Si unido a lo anterior, se suma un escenario caracterizado por vientos con alta velocidad, altas temperaturas en el medio, bajos niveles de humedad relativa en la atmósfera, entre otras variables ambientales, se cataliza el proceso de oxidación y la probabilidad de la combustión espontánea se incrementa fuertemente. La reacción de oxidación del carbón, más comúnmente se expresa de la siguiente manera:



Los procesos de oxidación y combustión de carbón están asociados a procesos de poca disipación del calor en el ambiente (Timko & Derick, 1995). Teniendo en como resultado un aumento en la temperatura del carbón hasta alcanzar la combustión espontánea. Si el calor de la oxidación no es disipado o removido del sistema, el carbón seguirá calentándose. Siempre que la velocidad de oxidación se incremente, la tasa de calentamiento se acelerará y el autocalentamiento inicial, superando el punto de ignición del carbón, llegando a la combustión espontánea. Estos procesos de oxidación comprometen una serie de reacciones heterogéneas (sólido-gas) donde el carbón representa la fase sólida y el oxígeno proveniente del aire provee la fase gaseosa. Pone et al. (2017) propusieron su ocurrencia en cuatro etapas:

- La primera etapa es la adsorción física de oxígeno, la cual se presenta a una temperatura que oscila entre los 30- 50 °C. Este proceso es donde se da el primer aumento de la temperatura y está relacionado con el calor producido como subproducto de la energía liberada al modificar la superficie del material. La energía de activación de esta fase no supera los 10 kCalorías/mol (Bustamante Rúa, 2016).
- La segunda etapa es la adsorción química también conocida como quimisorción o sorción activada, la cual se inicia a partir de los 50 °C de temperatura aproximadamente. Esta etapa se distingue por la formación progresiva de compuestos inestables de hidrocarburos y oxígeno conocidos como complejos de peróxido y la energía de activación es mayor a 20 KCalorías/mol (Bustamante Rúa, 2016b).
- La tercera etapa es aquella donde se llega a un punto conocido como la temperatura de calentamiento espontáneo del carbón y la reversibilidad de proceso comienza a desaparecer. En esta los complejos de peróxido que se habían formado, se empiezan a descomponer de forma acelerada en un rango de temperatura de 50 a 120 °C, y específicamente a 70 °C, con el fin de proporcionar oxígeno adicional en las etapas posteriores de la oxidación. Se tiene

que a temperaturas más altas, los complejos de peróxido se descomponen a una tasa mayor de la que se forman y los productos gaseosos de reacción química se liberan, como es el caso del monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua, ácidos oxálicos, ácidos aromáticos, e hidrocarburos insaturados.

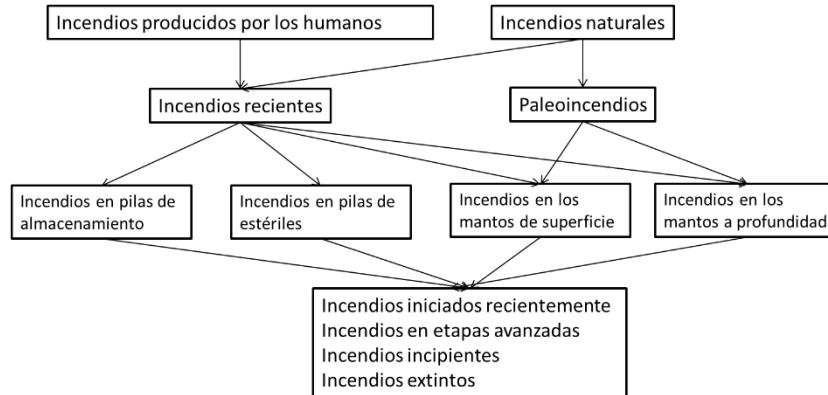
- La cuarta y última etapa se inicia a partir de una temperatura mayor 150 °C aproximadamente, donde el proceso de combustión se hace cinéticamente más rápido y es fuertemente irreversible.

Sin embargo, no hay ninguna comprensión de la transformación sufrida por los diferentes macerales cuando se somete a las condiciones típicas de la combustión. En general, la lipinita y la vitrinita son más reactivas y por lo tanto queman más eficazmente que la inertinita (Smith, Smoot, & Fletcher, 1993). Pero aun así, el contenido maceral no puede predecir exitosamente el comportamiento de la combustión de un carbón ya que muchas variables involucran el fenómeno y se debe estar en sinergia para dar una aproximación a la realidad física.

2.2.2 Modelo de combustión espontánea de los incendios de carbón

Los incendios de carbón son producidos en volúmenes de medios porosos, ocurriendo más frecuentemente en las juntas y accesos en minas de carbón subterráneo y en minas de carbón a cielo abierto en paredes finales, tajos abandonados y pilas de almacenamiento (Huo et al., 2015; R. V. K. Singh, 2013); sin embargo, existen otro tipo de clasificación de los incendios de carbón. Pueden agruparse de acuerdo con su génesis, edad, ubicación o estadio de combustión, como se observa la Figura 2-6 (Kuenzer & Stracher, 2012). Las características de los incendios que se estudiaron son los generados naturalmente, recientes, en superficie e incendios nuevos y en estado acelerado de combustión.

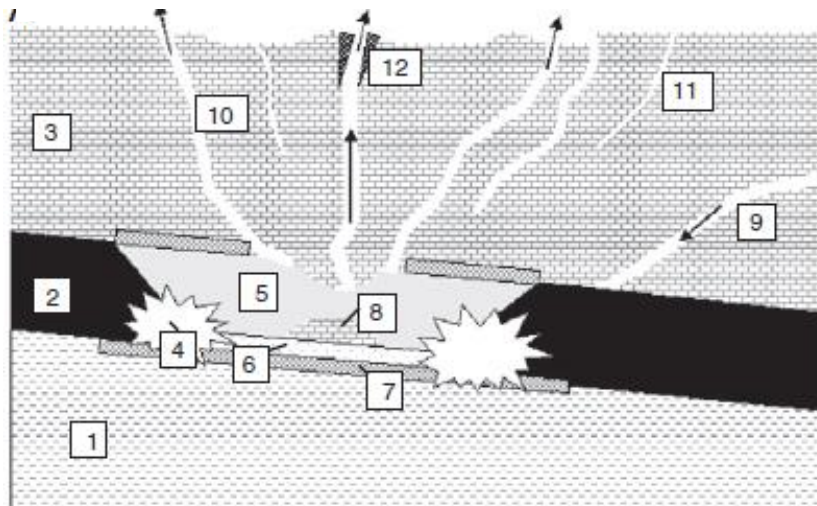
Figura 2-6. Clasificación de los incendios de carbón por génesis, edad, ubicación y etapa de combustión



Autor: (Kuenzer & Stracher, 2012)

Los incendios de carbón, las voladuras y los procesos geológicos pueden modificar el relieve, generando consigo fracturas superficiales, subsidencia del terreno y creando nuevas características geomorfológicas. Las fisuras se definen como estructuras lineales dentro de la superficie del lecho rocoso, que son estrechas (<0,5 cm). Las fisuras pueden oscilar entre unos pocos centímetros y varios metros de longitud. In situ, aparecen como líneas oscuras en la superficie del lecho rocoso (ver Figura 2-7) (Kuenzer & Stracher, 2012). Las grietas son estrechas estructuras lineales de gran extensión y son básicamente "fisuras abiertas" de la superficie de la roca. Las grietas pueden tener hasta varios metros de longitud y entre 0,5 cm a varios metros de ancho. Por lo general, una grieta se desarrolla a partir de una fisura. Las fisuras y grietas son vías para la ventilación de los incendios de carbón subterráneo (ver Figura 2-7) (Kuenzer & Stracher, 2012) adicionando oxígeno, humedad y aumentando el área superficial.

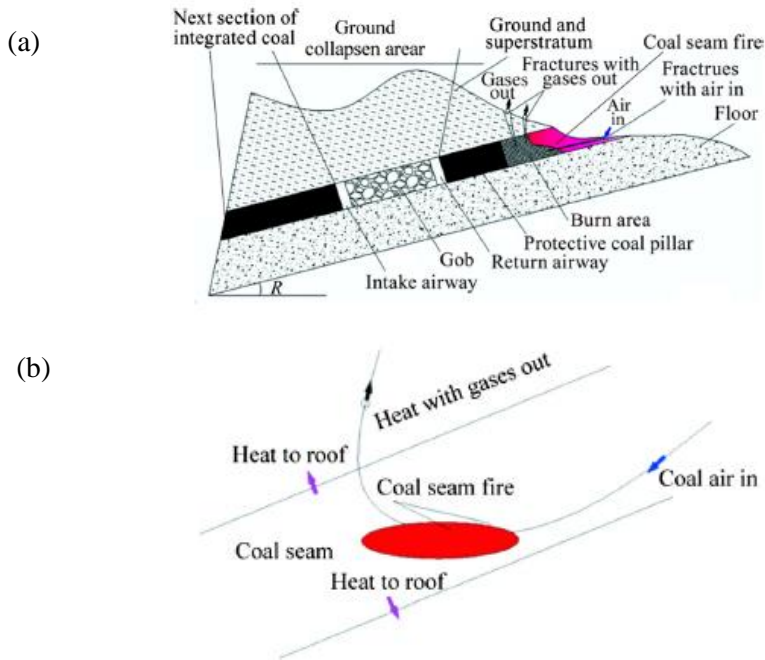
Figura 2-7. Diagrama esquemático del incendio de carbón subterráneo con grietas y fisuras. 1: capa de pizarra, 2: manto de carbón, 3: capa de arenisca, 4: incendio subterráneo de carbón ardiente, 5: cavidad subterránea de pérdida de volumen, 6: capa de ceniza, 7: roca piramórfica, 8: material de sobrecarga colapsado 9: ventilación entrante grieta, 10: grieta, saliente para el gas de escape, 11: fisura, 12: minerales cristalizando en la abertura de la grieta.



Autor: (Kuenzer & Stracher, 2012)

Se desarrollan dos hipótesis de la génesis de los incendios de carbón en los frentes y paredes finales, la primera es que el incendio se desarrolla en la superficie en las paredes finales y tajos abandonados de carbón aflorados y se propagan en sentido del buzamiento. La Figura 2-8a es la representación de la operación minera cuando el incendio se produce en superficie, producto de la influencia de la velocidad del viento, temperatura del aire, el porcentaje de oxígeno, el poder calorífico y la dureza del carbón (Bustamante Rúa, Bustamante Baena, & Daza Aragón, 2017). Los gases producto de la combustión son evacuados en la parte interna del manto por la misma porosidad (fracturamiento de los mantos de carbón). El modelo de contradifusión de gases producto de la combustión y transferencia de calor se muestra en la Figura 2-8b. De este modelo, se puede concluir que la combustión espontánea según el primero modelo, capta aire de la atmosfera producto de los vientos, mientras que el flujo de gases caliente producto de la reacción son liberados al ambiente debido al efecto de diferencia de presiones en las fracturas del manto de carbón (gradiente hidráulico) (Angelone, Garibay, & Cauhapé C., 2006).

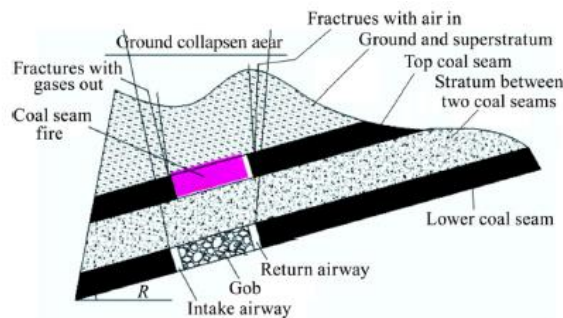
Figura 2-8. (a) Esquema de incendio en superficie del manto de carbón, (b) modelo de transferencias de los gases y el calor en los mantos de carbón.



Autor: (W. Lu et al., 2017)

El segundo modelo se asocia a que el incendio se produce en profundidad (oxígeno que llega por procesos técnicos de los macizos rocos y expansión por gases de combustión) (Kuenzer & Stracher, 2012; Quintero, Candela, Ríos, Montes, & Uribe, 2009a) y se propaga dependiendo del gradiente hidráulico. En la Figura 2-9 se puede ver la combustión espontánea de carbón, según el modelo de que el incendio se produce en profundidad.

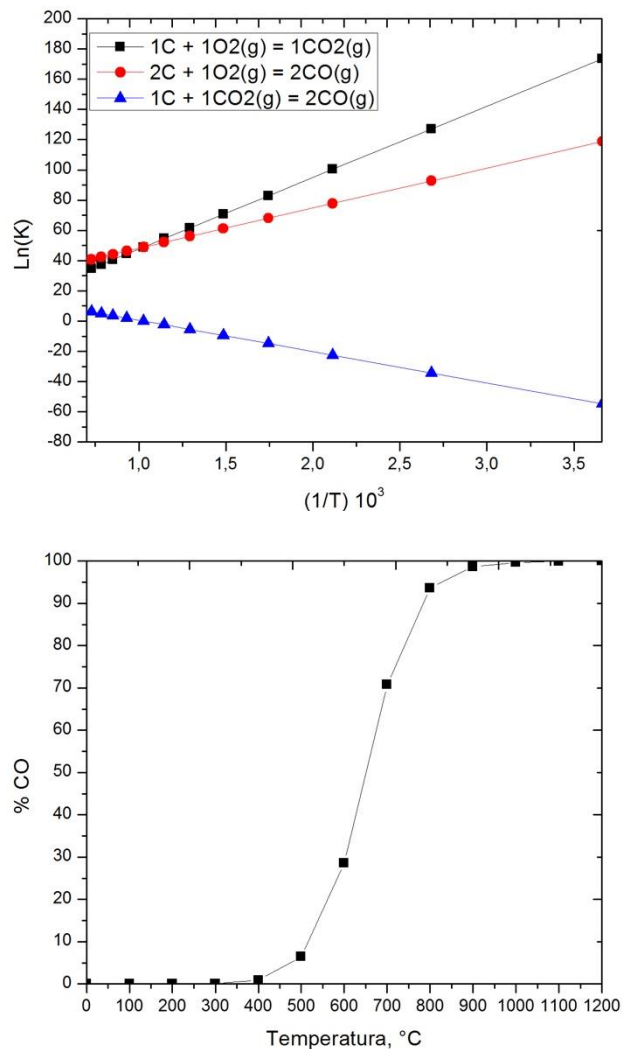
Figura 2-9. Modelo del origen del incendio en profundidad del manto de carbón.



Autor: (W. Lu et al., 2017).

La termodinámica suministra dos fuentes importantes de información necesarias para el cálculo del calor desprendido y absorbido durante la reacción y la propagación máxima posible de la misma (Octave Levenspiel, 1986). La termodinámica permite también el cálculo de la constante de equilibrio (K) a partir de la energía libre de Gibbs (ΔG) de las sustancias reaccionantes, que da la condición de equilibrio y de espontaneidad de las reacciones químicas.

Figura 2-10.(a) Relación de la constante de equilibrio con la temperatura de la propagación del carbón. (b) Relación del %CO con la temperatura de la propagación del incendio.

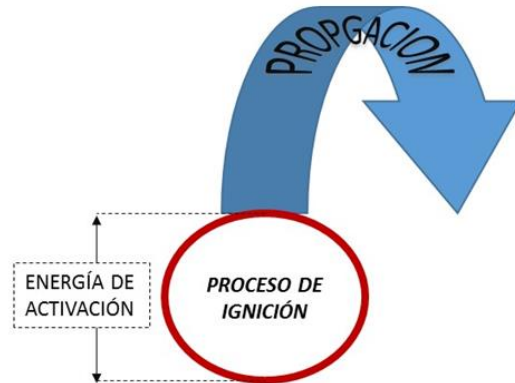


Autor: elaboración propia a partir de (OUTOKUMPU Technology, 2006)

La reacción de oxidación de carbón es factible, teniendo en cuenta que la constante de equilibrio (K) es muy grande y la presión parcial de oxígeno es cercana a cero, lo que implica que termodinámicamente la reacción ocurre en todo el intervalo de temperatura posible hasta infinito,

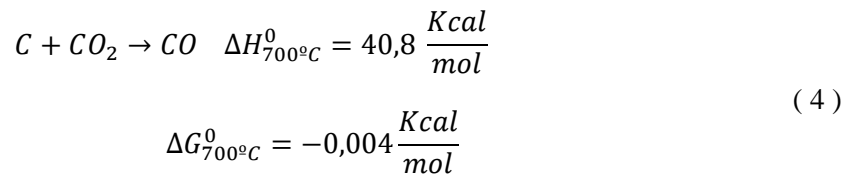
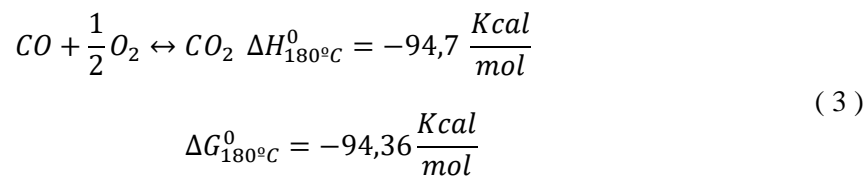
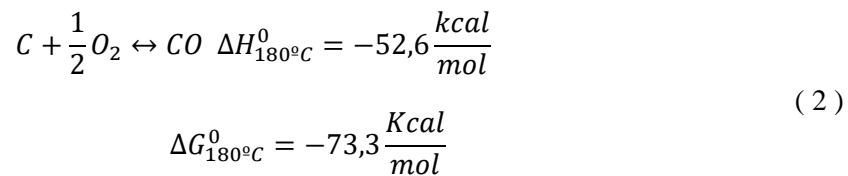
permitiendo que la reacción sea gobernada por la cinética química. La combustión espontánea de carbón es un proceso que se puede sub-dividir en dos etapas: ignición y propagación (ver Figura 2-11).

Figura 2-11. Etapas del incendio en los tajos de explotación.

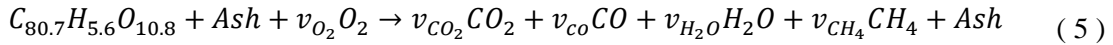


Autor: (Bustamante Rúa, 2016)

La ignición como proceso de oxidación y la propagación como proceso de combustión es un estado heterogéneo asociado a reacciones químicas en un sistema sólido/gas (carbón/aire) como se muestra en las Ecs.(2), (3) y (4):



O un modelo más complejo se tiene que (Ann G. Kim, 2011):



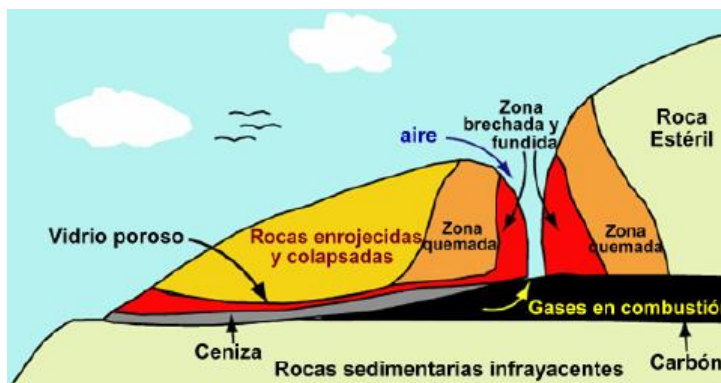
Donde el gas es el oxígeno disuelto en el aire circundante bajo condiciones fisicoquímicas determinadas (temperatura, presión parcial de oxígeno, humedad) y el sólido es el carbón junto con otros minerales caracterizado por la distribución de tamaño de partículas, área superficial expuesta, entre otros (Kaymakçi & Didari, 2002) que reaccionan y forman la ignición del carbón. La velocidad de las reacciones químicas y la intensidad de liberación de calor cambian con el aumento de la temperatura, y se producen cambios radicales debido a la pérdida de humedad comenzando a aproximadamente a los 100 °C (R. V. K. Singh, 2013). En este proceso se requiere que las condiciones establecidas tengan un suministro de una energía de activación mínima y necesaria (R. V. K. Singh, 2013; Wang, Chen, Yang, & Zhang, 2011) para que la reacción de oxidación se inicie y ocurra una reacción en cadena de liberación de calor, mediado a través de la entalpia.

La propagación de los incendios en los tajos y paredes finales puede ser estudiada teniendo en cuenta la termodinámica y cinética químicas que obedecen a ecuaciones de conservación de energía y las especies, respectivamente. Para constantes de equilibrio altas (teniendo a infinito) se tienen que la reacción es irreversible y ocurre en una sola dirección, como el caso de las Ecs. (2) y (3). El efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción viene dado por la energía de activación y por el rango de temperatura, como se observa en la. Las reacciones de oxidación de carbón produciendo monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) son altamente exotérmicas e irreversible por los valores de la constante de equilibrio K , la generación de dióxido de carbono es más espontánea en temperaturas de combustión de 180 hasta 700 °C. La reacción de monóxido de carbono es más espontánea a temperaturas desde los 700 hasta los 1.200 °C. Para la reacción de la Ec. (4) se muestra que es una reacción endotérmica y espontánea para temperatura superiores a 700 °C, siendo una reacción entre el carbón y el dióxido de carbono (CO₂) producido por la reacción de oxidación, el porcentaje de aparición de monóxido de carbono se muestra en la se muestra el incendio a gran profundidades de los mantos de carbón, sumado a una temperatura superior a la mencionada se puede generar una competencia entre la reacción del oxígeno con el dióxido de carbono (CO₂) favoreciendo a la propagación del incendio y demuestra la teoría que hasta en un porcentaje de hasta 2% de oxígeno se puede seguir propagando los incendios en profundidad (Scott, 1994). Por lo anterior se demuestra que la reacción de combustión del carbón es factible termodinámicamente y que se debe estudiar la cinética química, que es el proceso que gobierna la propagación.

Otro proceso que está asociado la combustión espontánea de carbón es el desencadenamiento progresivo de reacciones químicas, sumado a una intensa liberación de calor en el frente de reacción (reacciones exotérmicas como se puede ver en la Ecs. (2) y (3)), dejando en la etapa siguiente una capa de ceniza, pudiéndose simular como un sistema de reacción heterogéneo. Los factores que influyen en la propagación de los incendios se encuentran la actividad minera, la dirección de los vientos, las voladuras en el tajo, las estructuras geológicas, la profundidad de los estratos, el grado de fracturamiento del macizo y la naturaleza de los estratos (Dalverny & Chaiken, 1991; Huw, Sezer, & Kelello, 2009).

La detección de la propagación del incendio de carbón es útil para predecir su tendencia de desarrollo y puede proporcionar información útil para controlar y extinguir los incendios de carbón (Huo et al., 2015). Un manto de carbón que se ha quemado forma una capa de ceniza de pocos centímetros de espesor (ver Figura 2-12), ocasionando que el techo del manto colapse y que se formen fracturas que se propaguen hasta la superficie. Las áreas colapsadas y las fracturas, junto a la alta porosidad hacen que la roca suprayacente se quemee, actuando como chimenea que promueve el acceso de oxígeno en profundidad. De esta manera se permite que la combustión de carbón que se realiza en superficie se extienda en sentido del buzamiento (Angel & Herrera, 2004).

Figura 2-12. Esquema de una zona de combustión espontánea del carbón. Obsérvese la reducción del manto de carbón a una delgada capa de cenizas debido a la combustión y la relación entre la roca sana, la quemada y la fundida.

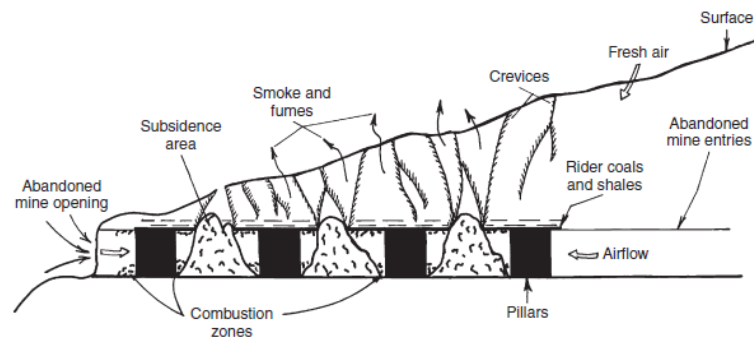


Autor: (Angel & Herrera, 2004)

En minas subterráneas del mundo de carbón que poseen varias entradas, tales como drenajes, la ventilación y los accesos, lo que genera incendios en el afloramiento más superficial donde hay más contacto con el oxígeno y se propagan a lo largo del mismo a través de los trabajos interconectados.

El calor se mueve por convección y conducción a través de la mina y fracturas. A medida que los estratos se calientan los pilares, techos y pisos de carbón fallan creando un sistema de grietas y fracturas a través de las cuales los humos salen de la mina (ver Figura 2-13), propiciando que los gases de combustión expandan las fracturas antiguas, dándole más área superficial al carbón y favoreciendo al fenómeno de propagación del incendio. Bajo estas condiciones, la mayoría de los incendios abandonados exhiben una combustión, que implica cantidades relativamente pequeñas de carbón en cualquier momento, con poca llama visible. Dichos incendios pueden arder durante largos períodos de tiempo (10-80 años) y son difíciles de extinguir (Dalverny & Chaiken, 1991).

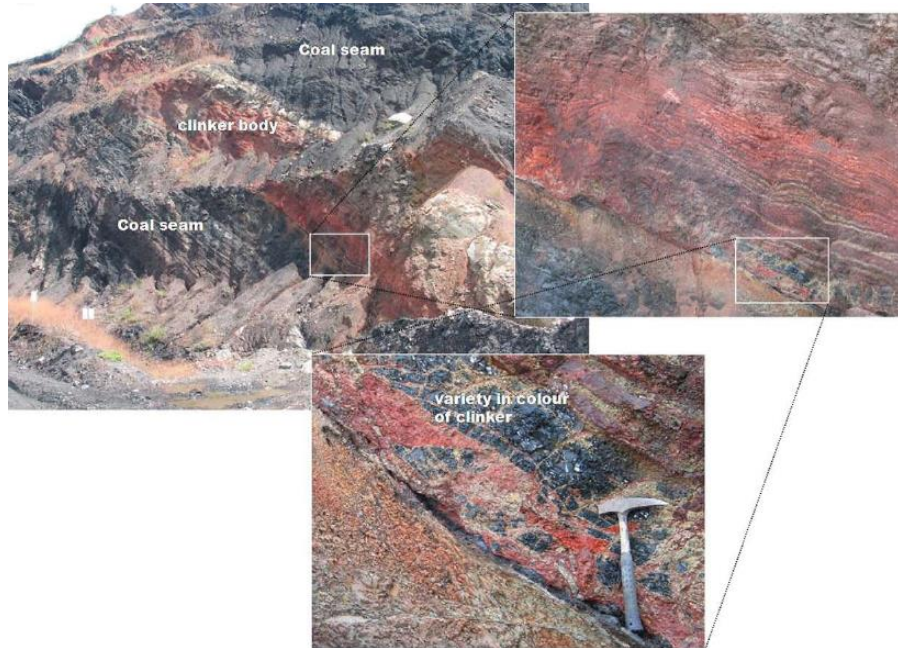
Figura 2-13. Incendio de carbón en una mina abandonada, muestra la emisión de humos a través de grietas y fracturas y la entrada de aire fresco a través de las aberturas y la sobrecarga.



Autor: (A.G. Kim & Chaiken, 1993)

En las formaciones de carbón de Cerrejón se evidencia un material rojizo con características de una calcina, producto de transformaciones térmicas a alta temperatura, denominado clinker, la cual se configura como la principal evidencia de incendios que existieron hace millones de años (paleoincendios) (Kuenzer & Stracher, 2012; Quintero et al., 2009b). De esta manera se define el clinker como una roca piro metamórfica formada por la alteración térmica extrema de lodolitas y areniscas durante la combustión natural de los mantos de carbón (ver Figura 2-14). Es un material poroso, de color rojo y con alta resistencia térmica, es decir que tiene la capacidad de oponerse al flujo del calor. Las propiedades físicas del clinker son significativamente diferentes a la de la roca original, durante su alteración térmica, el protolito es reducido y luego oxidado, liberándolo a su vez materia volátil y recristalizando los minerales como el hierro alrededor de la zona de combustión, lo que permite definir y limitar los cuerpos de clinker a partir de su alta susceptibilidad magnética, utilizando métodos geofísicos (Angel & Herrera, 2004). Existe una relación clara entre el contenido de humedad del carbón y la distribución de los cuerpos de clinker (Angel & Herrera, 2004).

Figura 2-14. Depósito de clinker en la mina Cerrejón.



Autor: (Berranco Melendez, 2011)

Las principales concentraciones de las áreas de clinker se localizan hacia la parte superior de la secuencia estratigráfica específicamente en las zonas de mayor complejidad estructural, y se encuentran relacionadas a cabalgamientos y fallas que en la mayoría de los casos actúan como barreras que impiden la continuidad de las áreas de clinker, pero que a su vez facilitaron la interacción de oxígeno con el carbón dentro de la secuencia sedimentaria (Quintero et al., 2009a). Si se estudian las estructuras de clinker, se puede observar cómo fue la propagación de los paleoincendios en la mina hace millones de años, de lo cual se puede concluir a primera impresión que los incendios, son en sentido del buzamiento y que pueden llegar hasta los 150 metros en profundidad como máximo (Gangopadhyay & Lahiri-Dutt, 2005; Kuenzer & Stracher, 2012; Quintero et al., 2009b) como se observa en la Figura 2-15, unidos a áreas con mayor alteración por fracturamiento natural de procesos geológicos, lo cual proporciona información importante para la modelación de la propagación en los mantos de la mina.

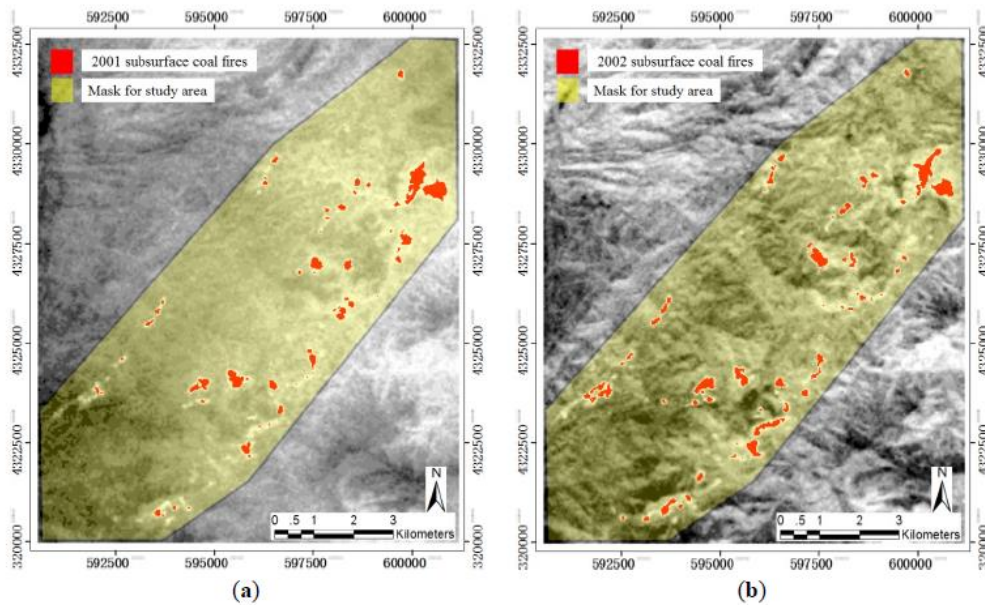
Figura 2-15. Zona de clinker donde se ve la propagación del incendio hace millones de años, en Tajo 100 de la mina Cerrejón.



Autor: (Angel & Herrera, 2004)

La teledetección, como técnica avanzada y con una larga historia de aplicación en la exploración de los recursos y en el monitoreo del medio ambiente, se ha utilizado para investigar los incendios de carbón durante casi 5 décadas (Huo et al., 2015). En las últimas dos décadas los estudios sobre los incendios del carbón se han centrado en el uso de satélites térmicos infrarrojos, ya que estos pueden utilizarse para recuperar la información de la temperatura de la superficie con más precisión, con la ayuda de múltiples canales espectrales en la región infrarroja térmica. Para la propagación de incendios se han estudiado por medio de Landsat ETM+ thermal band 7 (Huo et al., 2015). El Landsat 7 fue diseñado para que su vida útil fuese de 5 años, y tiene la capacidad de recolectar y transmitir hasta 532 imágenes por día. Se encuentra en una órbita heliosincrónica, lo cual significa que siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar. Tiene visión de toda la superficie terrestre en un tiempo de 15 días, realizando 232 órbitas. Los estudios demostraron que la propagación de los incendios tiene una velocidad de avance de $0,17 \text{ Km}^2/\text{año}$ (Huo et al., 2015), debido a la dirección de los vientos que favorecen de manera significativa el avance de la reacción (ver Figura 2-16). También, se menciona que la propagación más rápida se da en superficie a comparación de incendios subterráneos, debido a la escasa difusión de oxígeno en los mantos de carbón por las estructuras geológicas y los fracturamiento naturales del macizo.

Figura 2-16. Los incendios de carbón subterráneo extraídos de ETM + 7 datos de 2001, 2002. (a) los incendios de carbón subterráneo relacionados con anomalías térmicas de 2001; (b) incendios de carbón subterráneo relacionados con anomalías térmicas de 2002.



Autor: (Gangopadhyay & Lahiri-Dutt, 2005)

2.3 Cerrejón

La producción de carbón de Cerrejón es realizada en la zona norte del país (ver Figura 2-17), específicamente en la península del departamento de La Guajira, abarcando un área aproximada de 78.000 hectáreas.

Figura 2-17. Localización geográfica de Cerrejón en la península de La Guajira.



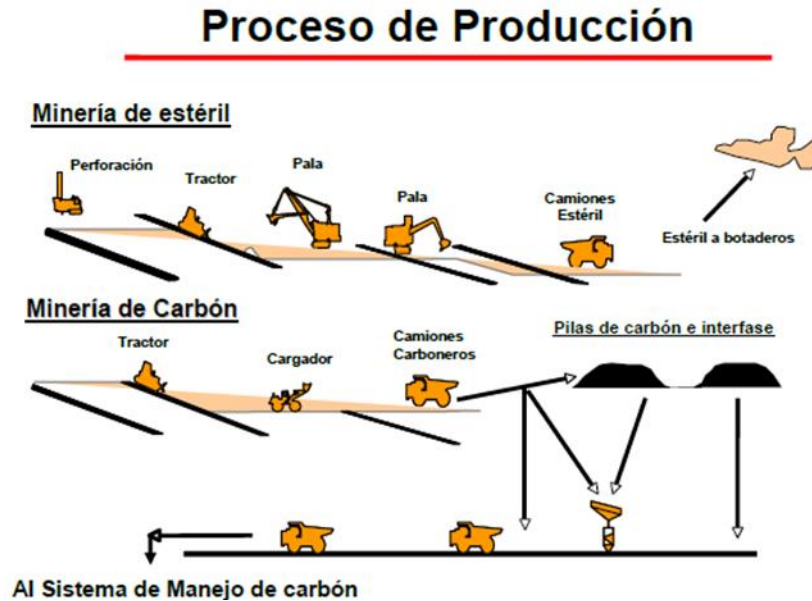
Autor:(Quintero et al., 2009b)

Se localiza en el valle delimitado por las estribaciones Nororientales de la Sierra Nevada de Santa Marta en el costado Este, y por la Serranía del Perijá y los Montes de Oca, por el costado Oeste. El yacimiento se encuentra dividido en tres grandes zonas:

- Norte.
- Centro: 2 zonas (Zona de Comunidad que es propiedad privada y zona Oreganal).
- Sur.

La excavación de la mina se encuentra localizada entre los municipios de Barrancas, Albania y Maicao del departamento de La Guajira. Cerrejón es una de las operaciones mineras de exportación de carbón a cielo abierto más grandes del mundo, un actor importante de la economía en Colombia y motor de La Guajira. Integra la exploración, extracción, transporte, embarque y exportación de carbón (ver Figura 2-18) (Cerrejón, 2016a).

Figura 2-18. Proceso de producción del carbón en Cerrejón.



Autor: (Cerrejón, 2016a)

Debido a la magnitud de la operación minera, la cual se acercó a 33 Mton de carbón al año para 2.016, la mina Cerrejón genera en su operación procesos difíciles de controlar por la escala de producción, generando afectaciones ambientales (Finkelman, 2004), sociales, y técnicas tales como la emanación de gases contaminantes, problemas de inestabilidad en taludes, etc., producto de la combustión espontánea de carbón (Finkelman, 2004; Kaymakçi & Didari, 2002; Moxon & Richardson, 1985; Ren, Shi, Guo, Zhao, & Bai, 2017).

La empresa desde hace años identificó que varios de sus mantos se han estado consumiendo por el fenómeno y desde entonces han buscado la manera de controlarlo y extinguirlo, sin aún encontrar el mecanismo propicio para esta problemática. Actualmente el proceso de combustión espontánea en la mina Cerrejón se presenta de forma puntual en los frentes de explotación, paredes finales, tajos abandonados y patios de almacenamiento, lo que se convierte en un tema de gran preocupación por parte de la empresa, por los impactos que representa y un posible cierre de minas a futuro.

Sin embargo, el fenómeno de combustión espontánea de mantos de carbón no está ligado exclusivamente a la producción minera (Angel & Herrera, 2004). Según (Departamento de Geología, 2017), se tiene evidencia de paleoincendios en los mantos de carbón, produciéndose antes de iniciar las labores de explotación, lo cual configura un escenario aún más complejo. Dichos paleoincendios

son evidenciados por las formaciones de clinker que se tienen en la mina (ver Figura 2-14). Parte fundamental del ejercicio de cualquier empresa minera es la obligación de llevar a cabo un control adecuado de la operación durante todo el tiempo de ejecución y garantizar a su vez condiciones idóneas para el cierre de minas. Esto es supervisado por la autoridad minera en su función de fiscalización, delegada por el Ministerio de Minas y Energía, consistente en realizar un control adecuado a la producción y explotación por el titular minero, así como el Ministerio del Medio Ambiente en el cumplimiento de los planes de manejo ambiental.

2.3.1 Antecedentes y actualidad de los incendios

Los incendios en el EWP (Expanded West Pit) (ver Anexo 1) comenzaron en el año de 1990. Por tal efecto INTERCOR en el año de 1991, inició la operación de control de los mismos a través de un contratista. Esta empresa contratista llamada impermeabilizaciones Creed Shot implementó su propio método que estaba muy enfocado a la parte técnica. La metodología utilizada por el grupo era básicamente la aplicación de Carbonato de Calcio (CaCO_3), posteriormente la aplicación de lodo de bentonita y finalmente utilizaban emulsión asfáltica para sellar el área afectada. Se realizaron varias pruebas las cuales tuvieron relativo éxito (Mendoza Daza, 2009). Posteriormente se realizaron mejoras en el procedimiento del método, reemplazando la totalidad de Carbonato de Calcio (CaCO_3), por agua la cual realizaba la misma función, y además después de controlado el fuego, se removió el material estéril con retroexcavadora para aislar el incendio y luego aplicar los sellos de lodo de bentonita y emulsión asfáltica.

Figura 2-19. Remoción de material caliente en la mina Cerrejón.



Autor: (Cerrejón, 2016b)

Hacia el año de 1994 y hasta 1999 la operación del control de los incendios pasó a manos de la empresa, mediante el departamento técnico y el de producción (ver Figura 2-19), sin embargo, no se prestó la atención adecuada y oportuna a los incendios presentes, por lo que los mismos se propagaron de manera incontrolable al no realizarse un control continuo. Dada la situación crítica del problema y en su afán de buscar alternativas técnicamente compatibles con la escala del incendio, realizaron pruebas con un producto químico rotulado como MAT 550® desarrollado por MAT Química. El proveedor ofrecía las ventajas de ser local y colocar el producto en la mina, lo que agilizaría su implementación. Las pruebas fueron realizadas entre noviembre del 2.000 y enero del 2001 (Mendoza Daza, 2009).

Se realizaron varias pruebas de apagado con al MAT 550®, cumpliendo roles de sofocante (evitar difusión y contradifusión de oxígeno y gases producto de la reacción, respectivamente) y sellante. Desde el año 2004 la atención prestada a esta problemática ha venido tomando fuerza debido a que se incrementó el número de incendios en los diferentes tajos, llegando aproximadamente a 200 en la mina. Por lo que se toma la decisión de plantear un proyecto que sea el único responsable de la prevención y control de la auto combustión de los diferentes mantos de carbón. Este se encuentra vigente y está a cargo de la superintendencia de soporte a la producción.

En la mina, se tienen implementadas medidas preventivas y medidas correctivas. Las medidas preventivas están asociadas a la gestión e implementación de acciones orientadas a evitar la ignición del incendio, mientras que las correctivas tiene como finalidad evitar la propagación y la extinción definitiva de los incendios (ver Figura 2-20a). Cabe mencionar que, debido a la escala de los incendios, el control, sofocamiento, seguimiento y extinción final merece que se involucre este aspecto directamente en los programas de planeamiento minero y cierre técnico de la excavación.

Figura 2-20. (a) Incendio en Cerrejón sobre una vía de paso con maquinaria pesada a los lados. (b) Inventario de los incendios en la mina por parte del grupo del control de incendios.



Autor:(Cerrejón, 2016a)

El proceso tiene 3 etapas: identificación, planeación y ejecución, las cuales se describen a continuación:

- La identificación consiste en una visita a campo, con el fin de realizar un inventario que especifique el estado de los incendios; es decir, si se encuentran activos (nuevos, reactivados o antiguos) e inactivos (ver Figura 2-20b).
- La planeación, en el cual se realiza un plan mensual y semanal, se definen prioridades, y se maneja la información para establecer el plan de sellado de mantos y el plan de extinción.
- La ejecución se llevan a cabo las acciones con el fin de controlar y extinguir los incendios, como lo son el enfriamiento, el sofocamiento, la remoción y finalmente el sellado.

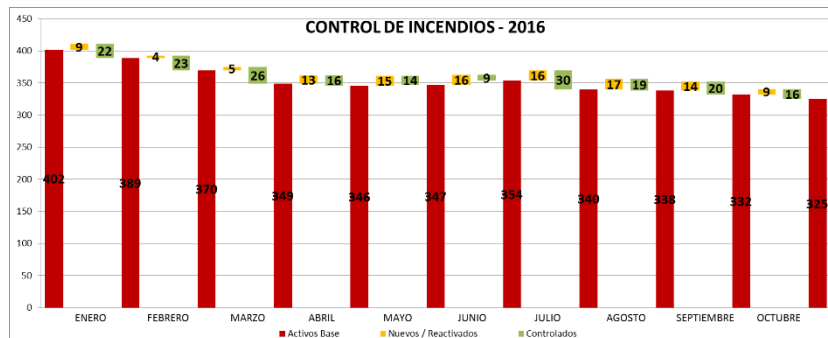
Por lo anterior, se cuenta con grupos de trabajo, en los cuales, desde el departamento de servicios técnicos, el soporte del grupo de geólogos y el soporte de la producción. El departamento de servicios técnicos está integrado por el área de planeación minera a corto plazo con quienes se define cada

54 Determinación y simulación de factores involucrados en la explotación de carbón que promueven la propagación de incendios en los tajos en la mina Cerrejón

mes los programas y seguimientos al control de los incendios, y su inclusión en el plan mensual, lo que incluye mapas, tablas, simbología y ubicación de los incendios mediante el uso de una geometría MINEX. El soporte del grupo de geólogos se encarga de la identificación de los mantos prendidos y seguimiento al control de los incendios. El soporte de producción está integrado por soporte a la operación en la ejecución de los programas de control de incendios con el soporte de un contratista. El personal de Cerrejón está conformado por 4 supervisores de soporte a la operación, 4 operadores de tractor de orugas y 2 operadores de tractor de llantas; mientras que el personal contratista tiene 2 cuadrillas conformadas por 2 coordinadores de campo, 4 auxiliares para sellado, 4 auxiliares para control de incendios y 8 operadores de retroexcavadoras.

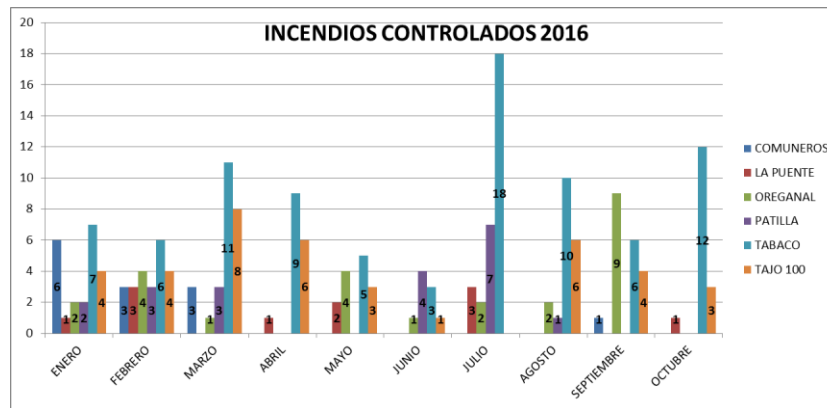
En la Figura 2-21 que se puede observar que al finalizar el mes de octubre del año 2016 se encontraban activos 325 incendios, de los cuales 316 eran antiguos y aparecieron 9 nuevos incendios. Es importante resaltar que durante algunos meses se presentaron más incendios nuevos que los que se pudieron controlar.

Figura 2-21. Control de incendios del 2016 en Cerrejón, comparado con su totalidad.



Autor: (Cerrejón, 2016a)

En la Figura 2-22 y la Tabla 2-4 se puede apreciar el total de incendios controlados para el año 2016 hasta el mes de octubre incluyendo los registros de cada uno de los tajos activos que se encuentran en la compañía. Durante este tiempo se concentraron los esfuerzos principalmente en tajo Tabaco y Tajo 100. Además, se evitó que se siguieran consumiendo aproximadamente 22.400 toneladas de reservas de Carbón.

Figura 2-22. Incendios controlados por Cerrejón en el 2016.

Autor: (Cerrejón, 2016a)

Tabla 2-4. Control de incendios en mantos de Cerrejón.

ID	Incendio	Tajo	Metodo	Impacto	
				Ambiental	Reservas
1	M_248	TAJO100	Remoción	Disminucion de emisiones de humo	Manto 110
2	M_249	TAJO10	Remoción	que afectan a la comunidad de Casitas	Manto 106
3	M_250	TAJO100	Remoción	y Campo Alegre, al bajar el inventario de incendio en un 6%	Manto 120
4	P_207	LA PUENTE	Remoción	Disminucion de emisiones de humo que afecta a la comunidad de Los Remedios, al bajar el inventario de incendios en un 2%	Manto 170
5	U_92	TABACO	Avance minería		Manto 175
6	U_106	TABACO	Avance minería		Manto 170
7	U_152	TABACO	Avance minería		Manto 170
8	U_153	TABACO	Avance minería		Manto 160
9	U_237	TABACO	Avance minería	Disminucion de emisiones de humo	Manto 70
10	U_265	TABACO	Remoción	que afecta a la comunidad de Albania,	Manto 155
11	U_276	TABACO	Avance minería	al bajar el inventario de incendios en un	Manto 160
12	U_377	TABACO	Remoción	15%	Manto 110
13	U_378	TABACO	Remoción		Manto 135
14	U_382	TABACO	Remoción		Manto 110
15	U_383	TABACO	Remoción		Manto 110
16	U_384	TABACO	Remoción		Manto 123

Autor: (Cerrejón, 2016a)

Como caso puntual se tiene el proyecto del control de incendio de la rampa de Sierra Nevada en el Tajo Oreganal, donde se tenía como alcance el control de 12 incendios y la recuperación de la rampa que conduce al fondo del tajo Oreganal (ver Anexo 1). Los métodos implementados para la recuperación fueron por medio de la sofocación con material arcilloso proveniente del avance de la pala K05. El mayor impacto generado a esta recuperación fue la reducción de las emisiones de humo que afectan a la comunidad de Campo Alegre y Casitas. Con el control de estos 12 incendios se salvarán reservas de carbón de aproximadamente 16.800 Ton. (Mantos 125, 130 y 135) (ver Figura 2-23).

Figura 2-23. Proyecto del control de incendio de la rampa de Sierra Nevada en el Tajo Oreganal.



Autor: (Cerrejón, 2016a)

2.3.2 Impactos de los incendios

La combustión espontánea de carbón en los diferentes escenarios donde se genera trae diversos efectos adversos, dentro de los que se encuentran en orden de relevancia los siguientes (ver Figura 2-24):

- **Impactos ambientales:** emisiones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), gases generadores de lluvia ácida (dependiendo del contenido de azufre del carbón), la emisión de olores fétidos producto de la concentración de SO_3 y la emisión de material particulado (Beamish, Barakat, & St. George, 2001; Huo et al., 2015; R. V. K. Singh, 2013).

- **Pérdidas de potenciales reservas:** el carbón se consume como parte de la reacción de oxidación o combustión en la superficie (Fierro et al., 1999; W. Lu et al., 2017), transformándolo en un nuevo material que no tiene las mismas propiedades térmicas que el carbón original (ceniza).
- **Pérdida de estabilidad de taludes:** los incendios dependiendo de su escala, afectan la estabilidad global de macizo. La afectación geotécnica por inestabilidad de las paredes a largo plazo, la infraestructura, condiciones de seguridad en la mina y también la degradación del suelo (Gangopadhyay & Lahiri-Dutt, 2005) como subsidencia donde se encuentra el incendio enterrado.
- **Financieros:** afectación en la productividad por cargue de material caliente y daños de componentes de equipos por las altas temperaturas, altos costos operativos para controlar y sofocar los incendios.
- **Legales:** problemas relacionados con el no cumplimiento del marco normativo que respecta al cierre de minas.
- **Imagen de la empresa:** generación de una visión negativa sobre la minería responsable que practica Cerrejón, creando una mala imagen sobre la compañía ante los entes gubernamentales y la sociedad.
- **Operativos:** afectación cumplimiento del plan minero y bajas productividades por re manejo de material caliente y protocolos de seguridad (Huo et al., 2015; Wan-Xing, Zeng-Hui, & De-Ming, 2011).

Figura 2-24. Potenciales impactos generados por la combustión de carbón.



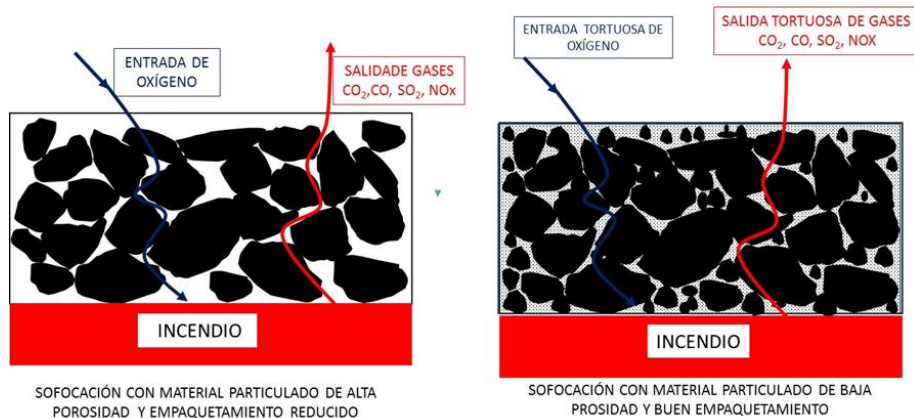
Autor: elaboración propia

2.3.3 Procedimiento para la extinción de los incendios

Para trabajar bajo las condiciones mencionadas y minimizar el impacto que genera la exposición de las operaciones y equipos se han desarrollado los siguientes procedimientos de control de incendios. Dichos procedimientos se describen a continuación:

- Por **sofocación** con tractores (ver Figura 2-26), se fundamenta en la adición de material estéril o aluvión sobre la zona del incendio hasta cubrirlo completamente buscando dificultar el transporte de gases desde la atmósfera hasta el hogar del incendio y viceversa, a través de la formación de una capa impermeable de entrada y salida de oxígeno y productos de combustión (CO y CO_2). Esta metodología ha reducido el impacto visual que generan los incendios en ciertas zonas y puede llegar a abarcar una buena extensión de área. Una limitación está ligada con el acarreo de material para la sofocación desde lugares lejanos para poder cubrir zonas incendiadas, además de que muchas veces no se cuenta con vías de acceso para el ingreso de la maquinaria. Sin embargo, la reducción de fenómenos de transporte de gases usando material sobre el incendio, requiere controles estrictos de granulometría del sistema particulado que se use y del espesor del lecho poroso compactado, dado que los coeficientes de difusión a través del lecho poroso están fuertemente afectados por la polidispersión de la distribución granulométrica; el cual a su vez determina el empaquetamiento (ver Figura 2-25).

Figura 2-25. Esquemas de difusión a través de lechos poroso en el sofocamiento del incendio, comparando lechos de alta porosidad y de baja porosidad controlados por la distribución de tamaños del sistema particulado usado.



Autor: elaboración propia.

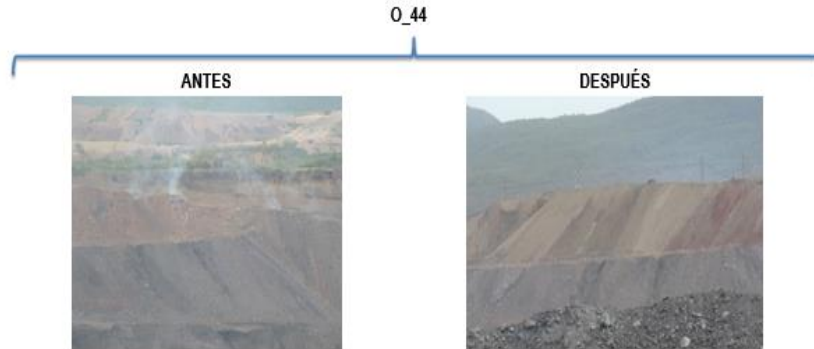
- Por **remoción** (ver Figura 2-19) consiste en desprender el material caliente que se encuentra en la pared mediante el uso de una retroexcavadora de brazo largo. Esta práctica ha sido válida, dado que ha permitido extinguir incendios incipientes y de mediana magnitud. Una limitación con la que cuenta este procedimiento, está condicionado a las altas temperaturas que se generan en los frentes, del orden de más de 800 °C que se perciben a pocos metros del foco del incendio. En este sentido, el operario de la retroexcavadora de brazo largo debe retirarse periódicamente por seguridad. Una alternativa para mejorar esta metodología, sugiere el uso de alguna sustancia enfriadora previa a la remoción para permitir la disminución de la temperatura del frente y así facilitar el trabajo del operario. Por otro lado, se tiene también como limitante del proceso, el tiempo que se debe invertir para llevar la retroexcavadora de un incendio a otro, generando un alto costo relacionado con el transporte de la maquinaria.

A partir de las observaciones de campo realizadas directamente por el autor, el material removido, que está generalmente en combustión, es dispuesto en pequeñas pilas al lado del sitio de remoción, generando consecuencias negativas tales como: dispersión de material de cenizas particulado a alta temperatura, no resuelve absolutamente la combustión dado que el material removido se convierte en sí mismo en un nuevo hogar de combustión, se evidencia que no se hace sellamiento posterior a este en algunos casos generando un nuevo escenario de ignición, costos asociados al mantenimiento y transporte del equipo y problemas de seguridad para el operador generados por la alta tasa de producción de CO y CO₂, que se produce en el frente de trabajo.

- El **Enfriamiento** (ver Figura 2-27), que por medio de la adición de agua sobre el incendio, el objetivo es saturar el incendio de agua para que la combustión se detenga, una desventaja es que si la adición de agua no es suficiente podría generar a futuro que el incendio se magnifique por la adición de oxígeno y humedad al carbón. Una de las limitaciones del enfriamiento es el transporte de agua desde las zonas de abastecimiento hasta el incendio, además puede promover que aumente el fenómeno de autocombustión al aportar oxígeno del agua, teniendo como consecuencia una temperatura mayor o igual en largos periodos de tiempo. Se debe procurar hacer un buen enfriamiento acompañado de remoción o adicionando la cantidad de agua suficiente para ahogar el incendio.

60 Determinación y simulación de factores involucrados en la explotación de carbón que promueven la propagación de incendios en los tajos en la mina Cerrejón

Figura 2-26. Trabajo de sofocación realizado por Cerrejón, antes y después.



Autor: (Cerrejón, 2016b)

Figura 2-27. Enfriamiento de manto de carbón en Cerrejón, con la ayuda de un tanquero.



Autor: (Cerrejón, 2016b)

Las metodologías implementadas actualmente por Cerrejón presentan limitaciones técnicas y operacionales, por lo que se realizó investigaciones que permitiera encontrar mecanismos para controlar de manera eficiente los incendios en la mina. En la Tabla 2-5 se muestra los métodos actuales que Cerrejón aplica en su operación con oportunidades de mejora sugeridas.

Tabla 2-5. Métodos actuales para el control de incendios y oportunidades de mejora.

Extinción de los incendios					
Total de los incendios en Cerrejón	Acción por parte de Cerrejón	Cantidad	Métodos de extinción	¿Qué se hace?	Propuesta de mejoramiento UNAL
	No controlado	Aprox. 50 % de los incendios	N/a	Los mantos de carbón que no son operacionalmente trabajables a causas que se asocian a factores de la operación minera y a las principales causas que genera la combustión de carbón en paredes altas y paredes finales. Los principales motivos por el cual no se puede trabajar en dichos incendios es la inestabilidad de taludes producto de la combustión y la disposición de los incendios (grandes alturas).	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar perforación para mapear incendios a profundidad, utilizando sensores térmicos. 2. Inyectar solución extintora directamente sobre el hogar del incendio con el fin de disminuir la temperatura y apagar el incendio. 3. Implementar aparatos tecnológicos que puedan alcanzar alturas superiores a las cuales los operarios del cerrejón pueden acceder hoy en día. 4. Modificar bombas de presión para alcanzar una mayor altura en las paredes altas e inyección de fluidos bajo tierra.
	Controlado	Aprox. 50 % de los incendios	1. Remoción	Se procede a combatir el manto de carbón prendido con un ángulo de 45 grados y en sentido contrario a las emisiones de gases, evitando la caída o desprendimiento de carbones incendiados o rocas sueltas. La operación se realiza hasta que haya desaparecido el material caliente del frente en su totalidad, lo cual es verificado por las cámaras térmicas.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ayudar al operario de la retro con alguna suspensión o pulpa que pueda disminuir la temperatura del incendio para optimizar el 20/20. 2. Dotar a los operarios de las retroexcavadoras con equipos medidores de gases con el fin de monitorear las concentraciones (CO y CO2) y evitar accidentes. 3. Dotar a los operarios de las retroexcavadoras con pistolas térmicas para monitorear la temperatura de los mantos que van a ser intervenidos.

62 Determinación y simulación de factores involucrados en la explotación de carbón que promueven la propagación de incendios en los tajos en la mina Cerrejón

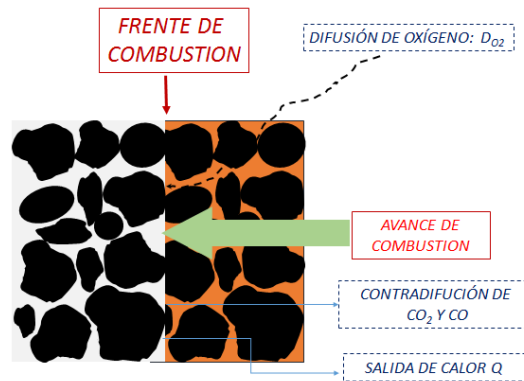
Extinción de los incendios					
			2. Sofocamiento	Se descarga el material estéril meteorizado sobre el área afecta con camión de estéril.	<p>1. Implementar materiales que disminuya la permeabilidad y la porosidad para evitar la difusión o la contra difusión de productos gaseosos y/o calor, de tal manera que se contribuya a la extinción.</p> <p>2. Mejorar la granulometría y compactación de los materiales utilizados.</p>
			3. Enfriamiento	Se disminuye la temperatura del incendio con el derrame de agua sobre el manto.	1. Adición de suspensiones coloidales (clinker) para el enfriamiento de los frentes atacados y posterior sellamiento.

Autor: elaboración propia.

3. Metodología para estudiar la propagación

La combustión del carbón involucra procesos de alta complejidad que son difíciles de predecir cuándo se tiene mantos de carbón en paredes finales a gran profundidad y tajos abandonados. No muchos estudios han tratado de predecir el fenómeno bajo esta complejidad, por eso se hace fundamental generar un modelo que se alimente con variables fisicoquímicas y termodinámicas para predecir la combustión de carbón. Los procesos involucran dinámica de fluidos, transferencia de calor en medio poroso; considerando que el fracturamiento del macizo producto de las voladuras y las estructuras geológicas; vuelven el manto de carbón un lecho poroso para el caso de estudio (ver Figura 3-1).

Figura 3-1. Esquema de propagación de los incendios en los mantos de Cerrejón.



Autor: elaboración propia.

3.1 Método de elementos finitos

La combustión espontánea de carbón resulta de una complejidad matemática tal que la deducción de las ecuaciones diferenciales que gobierna tal problema resulta muy difícil su solución por métodos exactos de análisis, aun después de introducir algunas hipótesis simplificadoras, no se logra si no para ciertos tipos de geometría, condiciones de contorno y sistemas de carga muy particulares (Jing, Hong-qing, & Zhen, 2016). Por esto, aunque este tipo de solución es la que más información proporciona sobre el comportamiento de las variables involucradas del problema dado, se debe recurrir a los métodos numéricos, los cuales permiten elaborar análisis y diseños con un alto grado de sofisticación y precisión (Liu et al., 2017).

Los métodos de los elementos finitos, de diferencias finitas, de volumen de control y de contorno, son apenas algunos, entre una gran gama de métodos numéricos que se han venido desarrollando y usando exitosamente, en la solución de muchos problemas en distintas áreas de la ciencia (COMSOL Inc., 1986; Liu et al., 2017; Wu et al., 2017). Aun cuando todos estos métodos constituyen una muy poderosa herramienta matemática, no dejan de ser métodos aproximados, debiéndose tener por lo tanto un especial cuidado en su utilización, ya que la calidad de las soluciones que se obtengan depende de varios factores, entre los cuales se pueden destacar la distribución de la discretización espacial de la región en estudio, el tipo de discretización en el tiempo en los problemas no permanentes, la aplicación apropiada de las condiciones de contorno, la correcta inclusión en el modelo de las propiedades físicas de los materiales que intervienen en el problema, etc. El correcto posicionamiento de estos aspectos requiere del sentido común y alguna experiencia del analista, independientemente del método seleccionado (Kumar, Deb, & Chakravarty, 2017). Visto globalmente los pasos a seguir para obtener la solución numérica de un problema dado se puede esquematizar de la siguiente manera (Courant, 1943):

- Definición del sistema real del problema a resolver.
- Transformación de este sistema en un modelo matemático.
- Discretización a través de alguna técnica numérica
- Obtención de la solución aproximada

La disponibilidad, en la actualidad, de numerosos programas computacionales basados en las diferentes técnicas numéricas mencionadas, ofrecen la oportunidad de obtener información muy detallada sobre el comportamiento de las variables involucradas en un determinado problema (Gupta, Sun, Xu, Sarv, & Farzan, 2016; Liu et al., 2017), como en este caso COMSOL multhyphiscs (ver Anexo 2).

3.2 Ecuaciones de conservación

Cada vez que se trata de resolver un nuevo problema relacionado con transferencia de calor y de las especies, es conveniente comenzar con un conjunto de ecuaciones basadas en leyes de conservación para sistemas físicos. Estas ecuaciones incluyen (Warren M, James P, & Young I, 2008):

- La ecuación de energía (conservación de la energía, o la primera ley de la termodinámica).
- La ecuación de conservación para especies (conservación de especies).
- La ecuación de la continuidad. (conservación de la masa)

Estas ecuaciones se denominan a veces ecuaciones de cambio, en la medida en que describen el cambio de velocidad, temperatura y concentración con respecto al tiempo y la posición en el sistema estudiado.

3.2.1 Ecuación de la conservación de la energía

Para un elemento de volumen estacionario a través del cual fluye un fluido puro, la ecuación de energía se lee (Timko & Derick, 1995; Warren M et al., 2008):

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\mathbf{u} + \frac{1}{2} V^2 \right) = -\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \left(\mathbf{u} + \frac{1}{2} V^2 \right) - \nabla q^m + \rho (\nabla \cdot \mathbf{g}) - \nabla \cdot P \mathbf{V} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V}) + q^m \quad (6)$$

Tasa de ganancia de energía por unidad de volumen	de	Tasa de aporte de energía por unidad de volumen	de	Tasa de aporte de energía por unidad de volumen	de	Tasa de trabajo realizado por el fluido por unidad de volumen	del	Tasa de trabajo realizado por el fluido por unidad de volumen	del	Tasa de trabajo realizado por el fluido por unidad de volumen	de	Tasa de generación de calor por la fuente externa

Donde \mathbf{u} es la energía interna. El lado izquierdo de esta Ec. (6), representa la tasa de acumulación de energía interna y cinética, no incluye la energía potencial del fluido, ya que esta forma de energía está incluida en el término de trabajo en el lado derecho. Para el análisis de la propagación de los incendios en los mantos de carbón se hace la suposición de que los únicos dos mecanismos que transfieren el calor de la reacción es la conducción y convección.

3.2.2 Ecuación de la conservación para especies

Para un volumen estacionario, la conservación de especies es:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla(C_i V) - \nabla \cdot J_i + r_i^m \quad (7)$$

Tasa de almacenamiento de especie por unidad de volumen	de	Tasa neta de convección de especies por unidad de volumen	de	Tasa neta de difusión de especies por unidad de volumen	de	Tasa de producción de especies por unidad de volumen
---	----	---	----	---	----	--

Utilizando la ecuación de conservación de masas, la ecuación anterior puede ser reordenada sin considerar la convección como transporte de especie debido a la velocidad media de todas las moléculas, haciendo la suposición que, por la ecuación de continuidad, la densidad del fluido no cambia en el tiempo (fluido incompresible) y por lo tanto $\nabla \cdot V = 0$

$$\rho \frac{\partial m_i}{\partial t} = -\nabla \cdot J_i + r_i^m \quad (8)$$

Donde m_i es la fracción en masa de las especies, $m_i = C_i/\rho$, donde ρ es la densidad de la mezcla. El término $\nabla \cdot J_i$ tiene el signo negativo porque la difusión vuelve más lenta la velocidad de la relación global.

3.2.3 Ecuación de la conservación de la continuidad

Para un volumen en el espacio se tiene (Warren M et al., 2008):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho V) \quad (9)$$

Tasa neta de efluencia de masa por unidad de volumen

La ecuación de continuidad en esta forma describe la tasa del cambio de densidad en un punto fijo del fluido. Al realizar la diferenciación indicada en el lado derecho de la Ec. (9) y recogiendo todas las derivadas de ρ en el lado izquierdo, obtenemos una forma equivalente de la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho(\nabla \cdot V) \quad (10)$$

La ecuación de continuidad de esta forma describe la tasa de cambio de densidad vista por un “observador flotando” en el fluido. Para fluidos de densidad constante (fluidos incompresibles), la ecuación de continuidad se convierte en:

$$(\nabla \cdot V) = 0 \quad (11)$$

3.3 Reacciones sólido-fluido

3.3.1 Reacción química

Una o varias sustancias pueden transformarse en otras que constituyen diferentes especies químicas. Si esto ocurre a partir de reordenación o redistribución de los átomos para formar nuevas moléculas, se tiene lo que se conoce como una reacción química. En este sentido, es importante conocer los mecanismos, los cambios físicos y energéticos que tienen lugar y la velocidad con que se forman los productos. La cinética química es el estudio de la velocidad con que ocurre la velocidad química, considerando todos los factores que influyen sobre ella y explicando la causa de la magnitud de esa velocidad de reacción. Además, es la base de importantes teorías sobre combustión, suministrando un método para el estudio de transporte de calor y materia, y sugiriendo métodos para tratar fenómenos de velocidad. La combustión de carbón se clasifica como una reacción heterogénea, ya que hay más de una fase presente en dicha reacción. Una fase sólida que es el carbón y una fase gaseosa que es el oxígeno presente en el aire, los cuales se combinan para formar productos gaseosos como el monóxido de carbono (CO) cuando la combustión es incompleta y el dióxido de carbono (CO₂) cuando la combustión es completa, gas metano y vapores de agua.

Variables que afectan la cinética de la reacción

En sistemas heterogéneos la velocidad de una reacción química puede estar afectada por diversas variables. En estos sistemas puede ocurrir que los materiales pasen de una fase a otra durante la reacción, siendo importante la velocidad de transporte de materia. En el caso de la combustión de carbón, la difusión de oxígeno a través de la capa gaseosa que rodea la partícula (ver Figura 3-1) a través de la capa de ceniza en la superficie de la partícula juegan un rol en la limitación de la velocidad de reacción, al igual que la transferencia de calor que se genere en el sistema. En una

reacción exotérmica como la combustión de carbón, si el calor desprendido por la reacción no se disipa rápidamente, se puede producir una distribución de temperaturas no uniformes que originarán velocidades de reacción diferentes en distintos puntos. Estos efectos de transmisión de calor y materia tendrán mayor importancia en las reacciones de velocidad alta, siendo indispensable en la determinación de las velocidades de la reacción y actuando como el factor controlante del proceso.

Velocidad de reacción

La velocidad de reacción se puede definir como la velocidad de cambio en el número de moles del componente i debido a la reacción (dN_i/dt). Esta se puede determinar de las siguientes maneras:

- Basada en la unidad de volumen del fluido reactante:

$$r_i^m = \frac{1}{V} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{volumen de fluido}) (\text{tiempo})} \quad (12)$$

- Basada en la unidad de masa de sólido en los sistemas sólido-fluido:

$$r_i^m = \frac{1}{W} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{masa de sólido}) (\text{tiempo})} \quad (13)$$

- Basada en la unidad de superficie de sólido en los sistemas gas-sólido:

$$r_i^m = \frac{1}{S} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{superficie}) (\text{tiempo})} \quad (14)$$

- Basada en la unidad de volumen de sólido en los sistemas gas-sólido:

$$r_i^m = \frac{1}{V_s} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{Volumen de sólido}) (\text{tiempo})} \quad (15)$$

En los sistemas heterogéneos todas las definiciones anteriores son aplicables y la elección de la forma de la ecuación cinética empleada en cada caso particular es cuestión de conveniencia.

Ecuación cinética para reacciones heterogéneas

Esta ecuación tiene en cuenta más de un proceso, por tanto, incorpora una expresión de cinética global que implica tantas etapas de transporte físico como etapas de reacción. Para esto se tiene que $t_{\text{transporte}}$ (velocidad de difusión de las especies en la interfase hasta el frente de reacción) y $r_{\text{reacción}}$ (velocidad a la que ocurre a velocidad en el frente de reacción), son las velocidades de cambio para los procesos individuales que afectan la velocidad global. Si el cambio se efectúa por varios caminos paralelos, la velocidad global será mayor que las velocidades correspondientes a cada uno de los

caminos individuales. De hecho, si los diferentes caminos paralelos son independientes entre sí, la velocidad global será simplemente la suma de todas las velocidades individuales.

En los sistemas heterogéneos como la reacción de combustión del carbón las resistencias a la reacción están en serie, por lo tanto, se deben tener en cuenta dos observaciones importantes:

Cuando han de compararse o combinarse velocidades, es necesario definir las con respecto a la misma base. Por ejemplo, supongamos que hemos de combinar la etapa de transporte de materia con la de reacción. Dado que la velocidad de transporte de materia se define como el flujo de materia normal a la unidad de superficie se tiene la ecuación:

$$r_{transporte} = \frac{1}{V_s} \frac{dN_i}{dt} \quad (16)$$

la etapa de reacción se define de manera análoga según la ecuación:

$$r_{reacción} = \frac{1}{V_s} \frac{dN_i}{dt} \quad (17)$$

Es decir, la velocidad de reacción se debe expresar de acuerdo con la unidad de superficie y no a la unidad de volumen. La reacción irreversible:



El componente A se difunde a través de una película en reposo hasta una superficie plana formada por B ; después reacciona A con B para dar el producto gaseoso R que se difunde a través de la misma película (en sentido contrario) hasta alcanzar la corriente principal del gas. El flujo de A por difusión hasta la superficie viene dado por (O Levenspiel, 2012):

$$r_{transporte} = \frac{1}{V_s} \frac{dN_i}{dt} = -D \frac{\Delta C}{\Delta x} = J_i \quad (19)$$

Donde el flujo difusivo J_i se obtiene a partir de la ley de Fick, siendo D es el coeficiente de difusión (m^2/s), C es la concentración (mol/m^3) y x la posición (m). La velocidad de transporte de oxígeno en la capa de ceniza ($r_{transporte}$) depende de la profundidad a la que se encuentre el frente de reacción. A medida que el frente se desplaza a una mayor profundidad la concentración del oxígeno decrece debido a la tortuosidad del flujo, donde se tiene por diversos estudios, que se alcanza el Δx máximo para la propagación del incendio. Por lo tanto, la cinética de la reacción química está condicionada

por la concentración de oxígeno que se tiene en el frente de reacción. A 150 metros de profundidad en el manto de carbón, la tortuosidad es tan alta que no alcanza a llegar oxígeno al frente y la reacción se detiene. Se ha encontrado a través de la determinación de la etapa controlante en estudios previos, que los procesos difusionales (difusión de oxígeno y contradifusión de productos gaseosos) (ver Figura 3-2) son los que controlan la reacción de combustión, ya que los mantos de carbón alcanzan temperaturas altas (mayores a 180 °C) y por lo tanto la reacción química ocurre rápidamente (Bustamante Rúa et al., 2017).

Cinética química en el fenómeno de propagación de incendios en mantos de carbón

La velocidad de la reacción puede ser descrita por la ley de acción de masa (Nunes & Marcilio, 2015; Wu et al., 2017).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = k_j^f \prod_{i \in react} C_i^{-V_{ij}} - k_j^r \prod_{i \in prod} C_i^{V_{ij}} \quad (20)$$

Donde k_j^f y k_j^r son las constantes de forward (hacia adelante) y reverse (reversa) respectivamente, la concentración de especies es denotada como C_i (mol/m³), los coeficientes estequiométricos están definidos como V_{ij} , siendo negativo en el caso de los reactivos y positivo para los productos. Las reacciones de combustión que se presentan durante el fenómeno de propagación son las Ecu. (2), (3). Ambas reacciones suelen presentarse en los mantos de carbón, obteniéndose dióxido de carbono en el caso de la combustión completa y monóxido de carbono en la combustión incompleta La velocidad puede ser expresada de la siguiente manera:

Combustión completa (formación de dióxido de carbono (CO₂))

$$r_i^m \text{ completa} = -\frac{d[C]}{dt} = -\frac{d[O_2]}{dt} = \frac{d[CO_2]}{dt} \quad (21)$$

Combustión incompleta (formación de monóxido de carbono (CO))

$$r_i^m \text{ incompleta} = -\frac{1}{2} \frac{d[C]}{dt} = -\frac{d[O_2]}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d[CO]}{dt} \quad (22)$$

Inicialmente, para realizar el análisis de cinética química de la reacción de combustión en un manto de carbón, se utilizó la ley de velocidad que expresa la relación de la velocidad de una reacción con la constante de velocidad y la concentración inicial de los reactivos elevados a una potencia (ver Ec.

(22)). Además de la dependencia en la concentración de las especies, la velocidad de la reacción también depende de la temperatura, la cual es utilizada en la ecuación de Arrhenius para calcular la constante de velocidad (ver Ec. (23)).

$$k = A \cdot \exp^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (23)$$

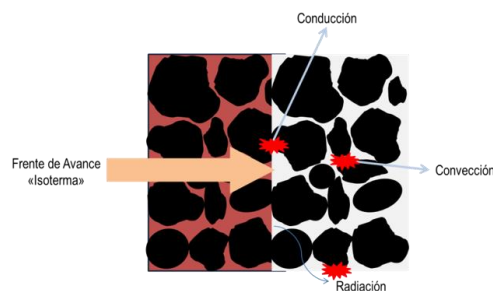
Donde A es el factor de frecuencia o colisiones, Ea es la energía de activación de la reacción, R es la constante universal de los gases ($8,314 \text{ J/mol K}$) y T es la temperatura de la reacción. La energía de activación fue calculada a partir de la temperatura de ignición para carbones bituminosos y la constante de Boltzmann (k_b). (Nordon, Young, & Bainbridge, 1979). En la Tabla 4-3 se presentan los datos tomados para hallar la constante de velocidad (Guerrero, López, & García, 2008).

3.3.2 Transferencia de calor

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que se presenta entre dos cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura entre ellos. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede transferirse, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia. El hecho de que el objetivo deseado del análisis sea la rapidez de la transferencia de calor, señala la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica (Hernández Wong, 2013).

El calor se define como la energía transferida en virtud de una diferencia de temperatura y fluye de regiones de mayor a regiones de menor temperatura. Los mecanismos de transferencia de calor son la conducción, la radiación y la convección, como se ilustran en la Figura 3-2. En este estudio de la propagación no se considerará la radiación como mecanismo de transferencia.

Figura 3-2. Esquema de mecanismos de transferencia de calor en los mantos de carbón del Cerrejón.



Autor: Elaboración Propia.

Conducción de calor

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. La conducción de calor se explica mediante la **Ley de la conducción de calor de Fourier**, como se observa en la Ec. (24)

$$H = -kA \frac{dT}{dx} \quad (24)$$

Donde $H(W/m)$ es el flujo de calor, $k(W/m K)$ es la conductividad térmica del material, magnitud que representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura, $A(m)$ es la superficie que entrega calor y dT/dx es el gradiente de temperatura en un gradiente de longitud (Inzunza R, 2002). El signo menos indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura.

En el macizo rocoso de Cerrejón se tienen que la conducción se produce por los contactos de carbón y la gran liberación de calor resultado de la reacción exotérmica. El contacto se da en lo que se denomina el frente de llama, que es una superficie que avanza progresivamente dejando una capa de ceniza (ver Figura 3-2).

Convección de calor

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio (Warren M et al., 2008). El modelo de transferencia de calor por convección se explica por la **Ley de enfriamiento de Newton**, como se muestra en la Ec. (25):

$$H = hA(T_A - T) \quad (25)$$

Donde $H(W/m)$ es el flujo de calor, $h (W/m^2 K)$ se llama coeficiente de convección, $A(m)$ es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T . La convección en los mantos de carbón de Cerrejón se produce por los movimientos de oxígeno que se produce en la matriz rocosa, por medio de los poros de la estructura.

Variables termodinámicas

Densidad ρ (kg/m^3): La densidad de una sustancia homogénea es una propiedad física que la caracteriza y está definida como el cociente entre la masa y el volumen de la sustancia que se trate. Esta propiedad depende de la temperatura, por lo que al medir la densidad de una sustancia se debe considerar la temperatura a la cual se realiza la medición. En el caso de sustancias no homogéneas lo que obtenemos al dividir la masa y el volumen es la densidad promedio.

Calor específico C_p ($J/kg \cdot K$): Describe la cantidad de energía térmica necesaria para producir un cambio de temperatura unitario en una masa unitaria. El calor específico a volumen constante C_v se puede definir como la energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado mientras el volumen se mantiene constante. El calor específico a presión constante C_p se puede definir como la energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado mientras la presión se mantiene constante. Los calores específicos son propiedades de un sistema en el estado de equilibrio. El calor específico a volumen constante (C_v) (ver Ecu.(26)) y el calor específico a presión constante (C_p) (ver Ecu.(27)) se definen como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = m c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (26)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = m c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (27)$$

Conductividad térmica k ($W/m \cdot K$): Un escalar o un tensor si la conductividad térmica es anisotrópica. La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras, la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto. En el caso de materiales isotrópicos (conductividad térmica similar en todas las direcciones espaciales), el valor de la conductividad es la misma en todas direcciones, por lo cual podemos considerarla como constante, solo si además el medio es homogéneo, y para materiales anisotrópicos k es un tensor simétrico de segundo rango, en el cual cada componente k_{ij} , que puede ser una función de la temperatura, produce la influencia de un gradiente de temperatura en la dirección de j y una densidad de flujo de calor en la dirección i .

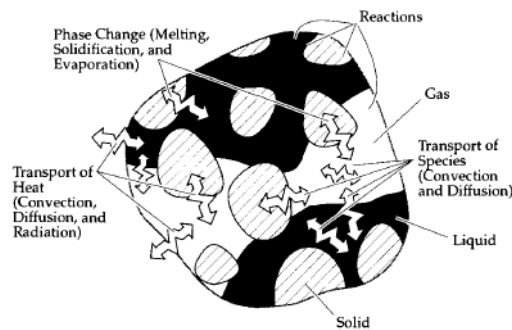
Campo de velocidad u (m/s): Una expresión analítica o un campo de velocidad a partir de una interfaz de flujo de fluido.

Fuente de calor $q^m(W/m^2)$: En el caso de los incendios de carbón va a ser el calor generado por la combustión.

Modelos de Transferencia de calor en medios porosos

La transferencia de calor en los medios porosos naturales se basa en el conocimiento que hemos adquirido en el estudio de la transferencia de calor en solidos no (Jing et al., 2016). La Figura 3-3 muestra estos fenómenos en el nivel de los poros. Descripción del transporte de especies, momento y energía, reacción química (endotérmica o exotérmica) y cambio de fase (sólido / líquido, sólido / gas y líquido / gas) a nivel de volumen.

Figura 3-3. Aspectos del tratamiento del transporte, reacción y cambio de fase en medios porosos.



Fuente: (Warren M et al., 2008)

La ecuación que gobierna la transferencia de calor en medios porosos es la ecuación de la conservación de la energía promediada sobre las fases del medio poroso (Nield & Bejan, 2013). Los términos de la ecuación son los de la Ec. (6), pero se tienen condiciones iniciales tales como: (a) el cuerpo esta fijo y el fluido es incompresible, (b) que la energía interna es igual al producto de la capacidad calorífica del solido por el cambio de la temperatura, (c) la tasa de trabajo hecha por el volumen por efectos de la gravedad , presión y fuerzas viscosas, no se consideran en el estudio. La ley de Fourier es asumida para los flujos de calor de conducción en cada fase, tomando promedios sobre un volumen elemental del medio que tenemos, para el sólido se tiene (Nield & Bejan, 2013; Schmal, Duyzer, & van Heuven, 1985; P. Singh, 2014; Warren M et al., 2008):

$$(1 - \theta)\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = (1 - \theta)\nabla \cdot (K_S \nabla T_S) + (1 - \theta)q_s^m \quad (28)$$

Y para el fluido:

$$\theta(\rho c_p) \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f u \cdot \nabla T_f = \theta \nabla \cdot (K_f \nabla T_f) + \theta q_s^m \quad (29)$$

Donde las letras s y f se refieren a las fases sólidas y líquidas, respectivamente, c es la capacidad calorífica del sólido, c_p es la capacidad calorífica del fluido a presión constante, k es la conductividad térmica del material. De la ecuación se puede deducir que el término $(1 - \theta)\rho c dT/dt$ y $\theta(\rho c_p)dT_f/dt$, es la tasa de ganancia de energía por unidad de volumen en ambos medios. El término $(\rho c_p)_f u \cdot \nabla T_f$ pertenece al flujo conectivo debido a la infiltración de fluido a través del lecho poroso. El término $(1 - \theta)\nabla \cdot (K_s \nabla T_s)$ y $\theta \nabla \cdot (K_f \nabla T_f)$ representa el flujo neto de calor en el elemento y, $(1 - \theta)q_s^m$ y θq_s^m representa el calor producido (COMSOL Inc., 1986; Nield & Bejan, 2013; Wu et al., 2017). En la Ec. (29) se usa la relación de Dupuit-Forhheimer que es $u = \theta U$. Ajustando la Ec. (28) y (29) se tiene la relación global de la transferencia de calor de la siguiente manera (ver Ec. (30)) (Jing et al., 2016)

$$(\rho c_p) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_f u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K_m \nabla T) + q_m^m \quad (30)$$

Y dónde:

$$(\rho c_p) = (1 - \theta)\rho c + \theta(\rho c_p) \quad (31)$$

$$k_m = (1 - \theta)k_s + \theta k_f \quad (32)$$

$$q_m^m = (1 - \theta)q_s^m + \theta q_f^m \quad (33)$$

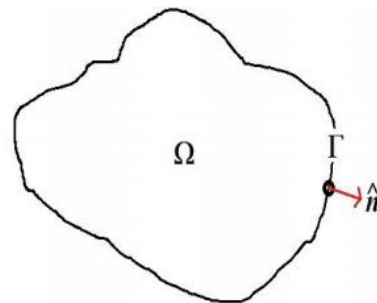
Son la capacidad térmica total por unidad de volumen, la conductividad térmica global y la producción global de calor por unidad de volumen del medio, respectivamente.

Condiciones de frontera

En el tratamiento matemático, las condiciones iniciales y de frontera no son tomadas como condiciones en las cuales la temperatura debe satisfacerse en la superficie o en el instante de tiempo $t = 0$. Estas son tomadas como condiciones de límite. Las condiciones de frontera deben ser entendidas en el sentido que, para una $t > 0$ fija, la combinación dada de la temperatura y sus derivadas tienden al valor prescrito como nosotros aproximamos en un punto de la superficie. Las condiciones iniciales deben de ser entendidas en el sentido que, para un punto fijo dentro de una región, la temperatura tiende al valor prescrito como $t \rightarrow 0$.

Para el caso de la conducción de calor en sólidos, estas condiciones expresan la conexión del sólido con el medio ambiente. Esta conexión es generalmente representada en la frontera del sólido ya sea por una densidad de flujo conocida o por una temperatura conocida. En este estudio se consideró la condición de frontera de Neumann, este tipo de frontera se expresa matemáticamente como (Hernández Wong, 2013):

Figura 3-4. Condición de frontera de Neumann

$$\frac{\partial}{\partial \hat{n}} y(x) \Big|_{s \in \Gamma} = g_N(s)$$


El diagrama muestra un dominio Ω irregularmente shaped. Su frontera es etiquetada como Γ. En un punto de la frontera, se muestra un vector normal unitario n-hat que apunta hacia el exterior del dominio.

Autor: (Hernández Wong, 2013)

Es decir cuando una densidad de flujo de calor q^m en una porción de la frontera $\delta\Omega$ de la frontera Ω se expresa como (COMSOL Inc., 1986; Hernández Wong, 2013; Wu et al., 2017):

$$-n \cdot (-k\nabla T) = q^m \text{ en } \delta\Omega \quad (34)$$

Esta función denota que (a) una condición adiabática ($q^m = 0$) (b) una condición de simetría ($q^m = 0$ en el plano de simetría).

4. Simulación numérica de la propagación

La metodología utilizada para describir la propagación de la simulación para la transferencia de calor y la reacción química en el del manto de carbón se describen en este capítulo. Los balances obtenidos constituyen a un sistema no lineal de ecuaciones diferenciales parciales altamente acopladas que fueron resueltas por medio de métodos numéricos usando el software comercial COMSOL Multiphysics que implementa el método de los elementos finitos (MEF). El módulo de Transferencia de calor y el Transporte de Especies Químicas fueron seleccionados con el propósito de construir un modelo completo en el software. El módulo de “Transferencia de calor en medios poroso” fue utilizado para resolver los balances de energía, tiempo de propagación y la distribución de temperatura a lo largo del manto de carbón y en sus rocas suprayacente y subyacente. El módulo de Reacciones en Ingeniería se utilizó para estudiar el consumo de las concentraciones de carbón y oxígeno y la tasa de aparición de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂).

4.1 Datos experimentales

Para determinar valores iniciales de la simulación en COMSOL se hicieron diferentes estudios previos referentes a la velocidad de propagación y el volumen de carbón consumo bajo condiciones normales de los incendios de la mina. Se estudiaron dos frentes incendiados en la mina en el Tajo 100 y se midieron las distancias alcanzadas de los incendios a los 3 y 6 meses producto de visitas de campo en la mina en los mismos periodos de tiempo, determinando los valores del campo de velocidad del medio poroso, la tasa de consumo volumétrico de carbón y la temperatura de avance, el procedimiento para estas pruebas fue destapar el carbón incendiado con uno de los equipos de remoción de la empresa y midiendo la distancia avanzada con la previa caracterización del incendio.

Tabla 4-1. Valores de velocidades de propagación medidos en Cerrejón.

	Tiempo (Mes)	Distancia del frente (m)	Velocidad de propagación (cm/día)
Medición1	0	0	-
Medición2	3	5	5,6
Medición 3	6	12,9	7,2

Autor: elaboración propia

En laboratorio se desarrolló una prueba, en la cual se sometió un bloque de carbón a altas temperaturas y se miró el comportamiento de transformación de carbón a ceniza para así tener una base de la combustión de carbón. Los resultados se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Ensayos de laboratorio para determinar la tasa de combustión de carbón.

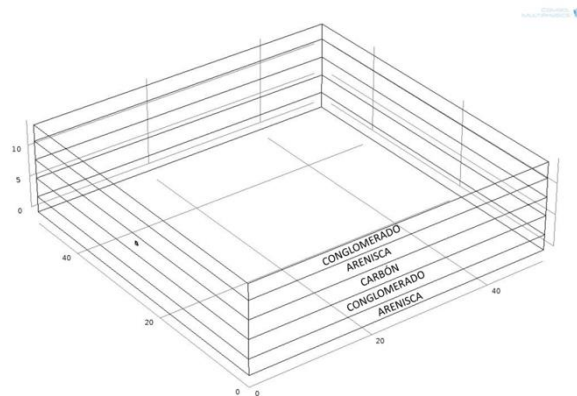
	Volumen cm^3	Exceso de Oxígeno	Temperatura ($^{\circ}C$)	Tiempo (min)
Prueba 1	1.980	Si	1.000	33,3
Prueba 2	2.100	No	1.000	60

Autor: elaboración propia

4.2 Geometría

Los mantos de carbón y los estratos de roca caja fueron diseñados en tablonces (ver Figura 4-1), con espesores promedio según el registro de perforaciones suministradas por el grupo de geología de la compañía. Se tomó la decisión de simular los estratos de carbón con estas características de longitud y profundidad porque es la extensión máxima que se estudió en la mina de los megos incendios en superficie.

Figura 4-1. Geometría seleccionada y geológica utilizada para la simulación.



Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

4.3 Materiales

Los materiales usados para la simulación es el carbón, la arenisca el conglomerado, minerales predominantes en la geología de la mina. Cada uno de los materiales tiene variables termodinámicas

asociadas que fueron calculadas en laboratorio y por la información encontrada en la bibliografía. Los valores utilizados para la simulación se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Parámetros termodinámicos utilizados en las simulaciones de COMSOL.

Variable	Nombre	Valor	Unidad	Fuente
k_{carbon}	Conductividad Térmica del Carbón	0,2	$\frac{W}{m \cdot k}$	Calculado en laboratorio y validado en (Warren M et al., 2008)
$k_{Arenisca}$	Conductividad Térmica de la Arenisca	2,9	$\frac{W}{m \cdot k}$	(Pone et al., 2007; Warren M et al., 2008)
$k_{conglomerado}$	Conductividad Térmica del Conglomerado	2,15	$\frac{W}{m \cdot k}$	(Pone et al., 2007; Warren M et al., 2008)
ρ_{carbon}	Densidad del Carbón	1.200	$\frac{kg}{m^3}$	Calculado en laboratorio y validado en (Warren M et al., 2008)
$\rho_{arenisca}$	Densidad de la Arenisca	2.600	$\frac{kg}{m^3}$	(Carras & Young, 1994; Pone et al., 2007; Warren M et al., 2008)
$\rho_{conglomerado}$	Densidad del Conglomerado	2.000	$\frac{kg}{m^3}$	(Bustamante Rúa et al., 2017; W. Lu et al., 2017; Warren M et al., 2008)
$c_{p-carbon}$	Capacidad Calorífica del Carbón	1.130	$\frac{J}{kg \cdot k}$	Calculado en laboratorio y validado en (Warren M et al., 2008)

Variable	Nombre	Valor	Unidad	Fuente
$c_{p-arenisca}$	Capacidad Calorífica de la Arenisca	745	$\frac{J}{kg \cdot k}$	(Warren M et al., 2008)
$c_{p-conglomerado}$	Capacidad Calorífica del Conglomerado	819	$\frac{J}{kg \cdot k}$	(Warren M et al., 2008)
u	Campo de velocidad	0,0032	$\frac{m}{s}$	Calculado en laboratorio
θ_p	Porosidad del sistema	2	%	(Manger, 1963)
P	Presión absoluta	120000	Pa	(Wu et al., 2017)
T_0	Temperatura del cuerpo Inicial	35	°C	Asumida
h	Coefficiente de transferencia de calor del aire	20	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	(Warren M et al., 2008)
T_{ext}	Temperatura del incendio	1.200	°C	Definido por autores
t	Tiempo simulado	1-31.540.000	Seg.	Definido por autores
Ea	Energía de activación	198.600	J/mol	Definido por autores
k	Constante de la Reacción	0,010	1/s	Definido por autores

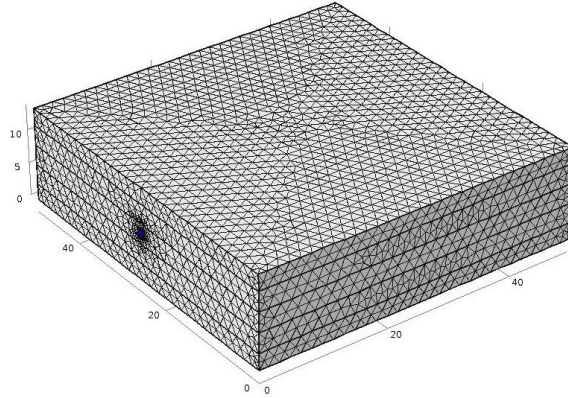
Autor: elaboración propia

4.4 Discretización y generación de malla

El mallado en un proceso de simulación es la discretización del dominio, es decir la geometría se divide en n elementos de dominio los cuales se interconectan entre sí por medio de nodos. Se estableció una grilla de la simulación extrafina para que los resultados se aproximen más a la realidad (ver

Figura 4-2). Con 199.994 elementos tetraédrales y 17.425 elementos triangulares y un volumen total de elementos de $725.000 m^3$.

Figura 4-2. Malla de la simulación en COMSOL, primera imagen grilla para simulación de un foco de incendio, segunda imagen simulación para pantalla completa de incendio

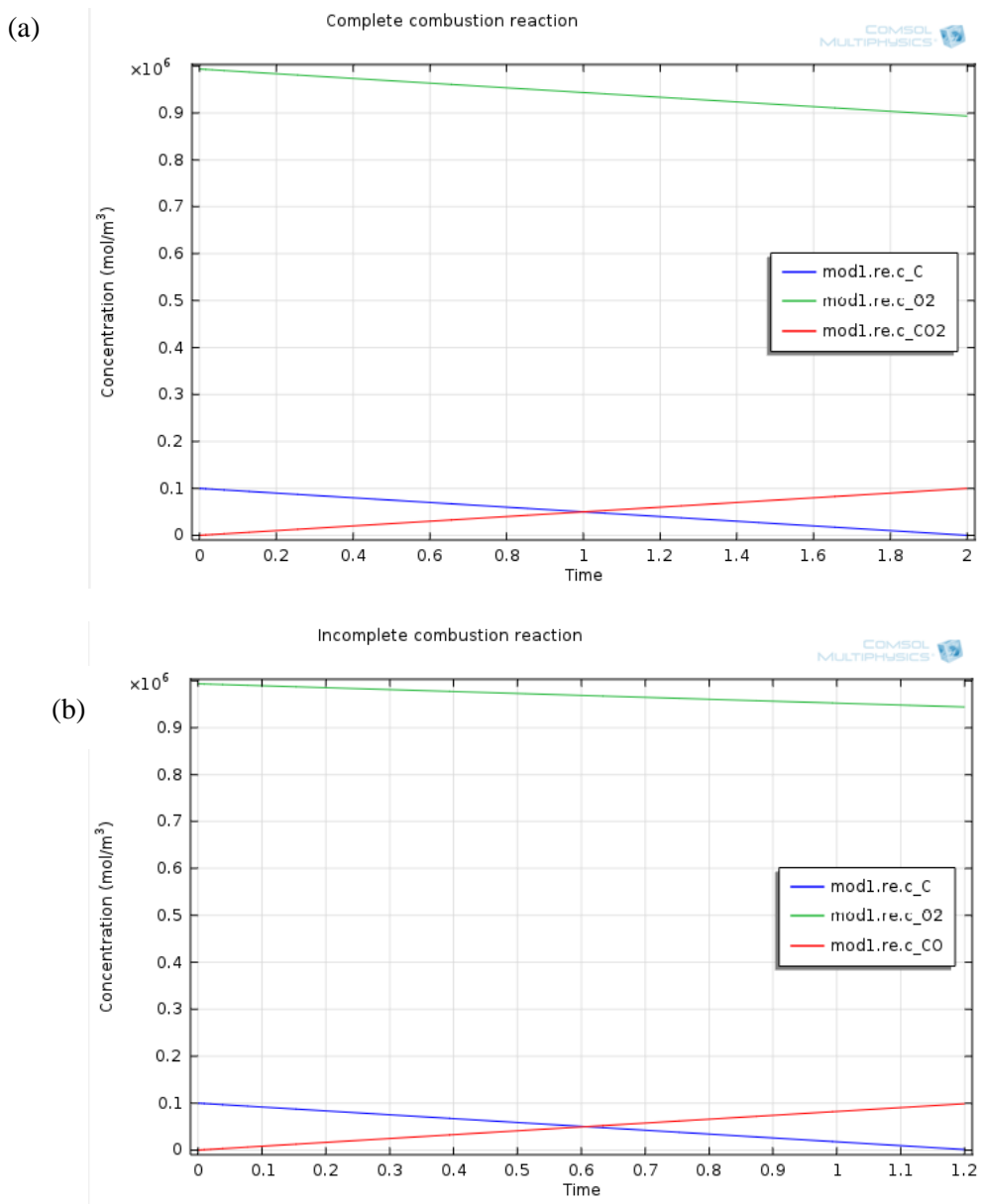


Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

4.5 Resultados y discusión de la simulación

Se desarrolló dos simulaciones para observar la de combustión completa e incompleta del carbón, teniendo en cuenta los escenarios de exceso de oxígeno (en superficie) y deficiencia de oxígeno (en subterránea), Los resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 4-3.

Figura 4-3. (a) Variación de las concentraciones de carbón, oxígeno y dióxido de carbono con respecto al tiempo (seg). (b) Variación de las concentraciones de carbón, oxígeno y monóxido de carbono con respecto al tiempo (seg).



Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

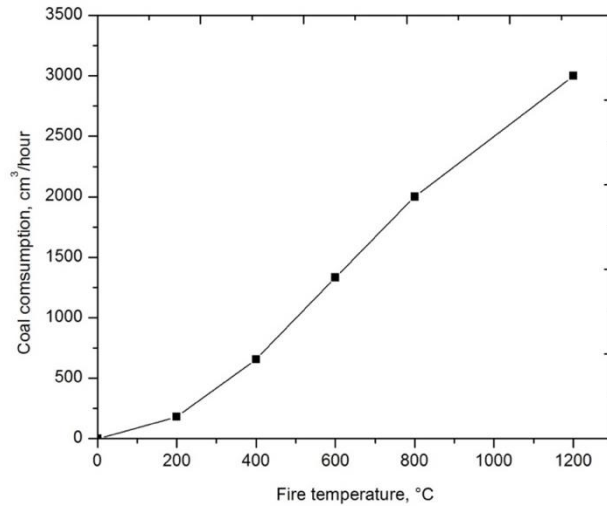
En este caso, la reacción de combustión completa se detiene a los 10 segundos, debido a que es el tiempo requerido para que un centímetro cúbico de carbón reaccione con el oxígeno y se consuma

completamente para producir dióxido de carbono (CO_2), de acuerdo con las concentraciones iniciales de cada reactivo. Extrapolando los resultados, se obtiene que para un metro cúbico el tiempo que se debe emplear para consumir completamente el carbón bajo las mismas condiciones sea de 23 días. En la Figura 4-3a se observan los resultados de la simulación para la combustión incompleta.

Para el caso de la reacción de combustión incompleta, se tiene que el tiempo requerido para que se consuma completamente una partícula de carbón de un centímetro cúbico es de 1,2 segundos de acuerdo con las condiciones iniciales de concentración de las especies que se establecieron previamente. Esto indica que la velocidad de la reacción para producir monóxido de carbono (CO) es más alta comparada con la velocidad de la reacción para producir dióxido de carbono (CO_2). Extrapolando nuevamente los resultados, se obtiene que para un metro cúbico el tiempo que se debe emplear para consumir completamente el carbón bajo las mismas condiciones sea de 14 días.

Para estudiar un escenario real de propagación la generación de ambos productos de reacción se debe de tener en cuenta, por lo que se desarrolló una tasa global de productos gaseosos y se establecieron nuevas simulaciones para diferentes temperaturas y así determinar el consumo volumétrico de carbón en los mantos de la mina. En la Figura 4-4 se observa la tasa a la que se consume el carbón en el tiempo, dependiendo de la temperatura del incendio. Se tiene que la tasa de consumo de carbón aumenta con el incremento de la temperatura. Por lo tanto, si el manto de carbón presenta un incendio con una temperatura de 200°C , la tasa de consumo de carbón es aproximadamente $200\text{ cm}^3/\text{hora}$, mientras que, si el incendio presenta una temperatura de 1.200°C , la tasa de consumo de carbón es aproximadamente $3.000\text{ cm}^3/\text{hora}$.

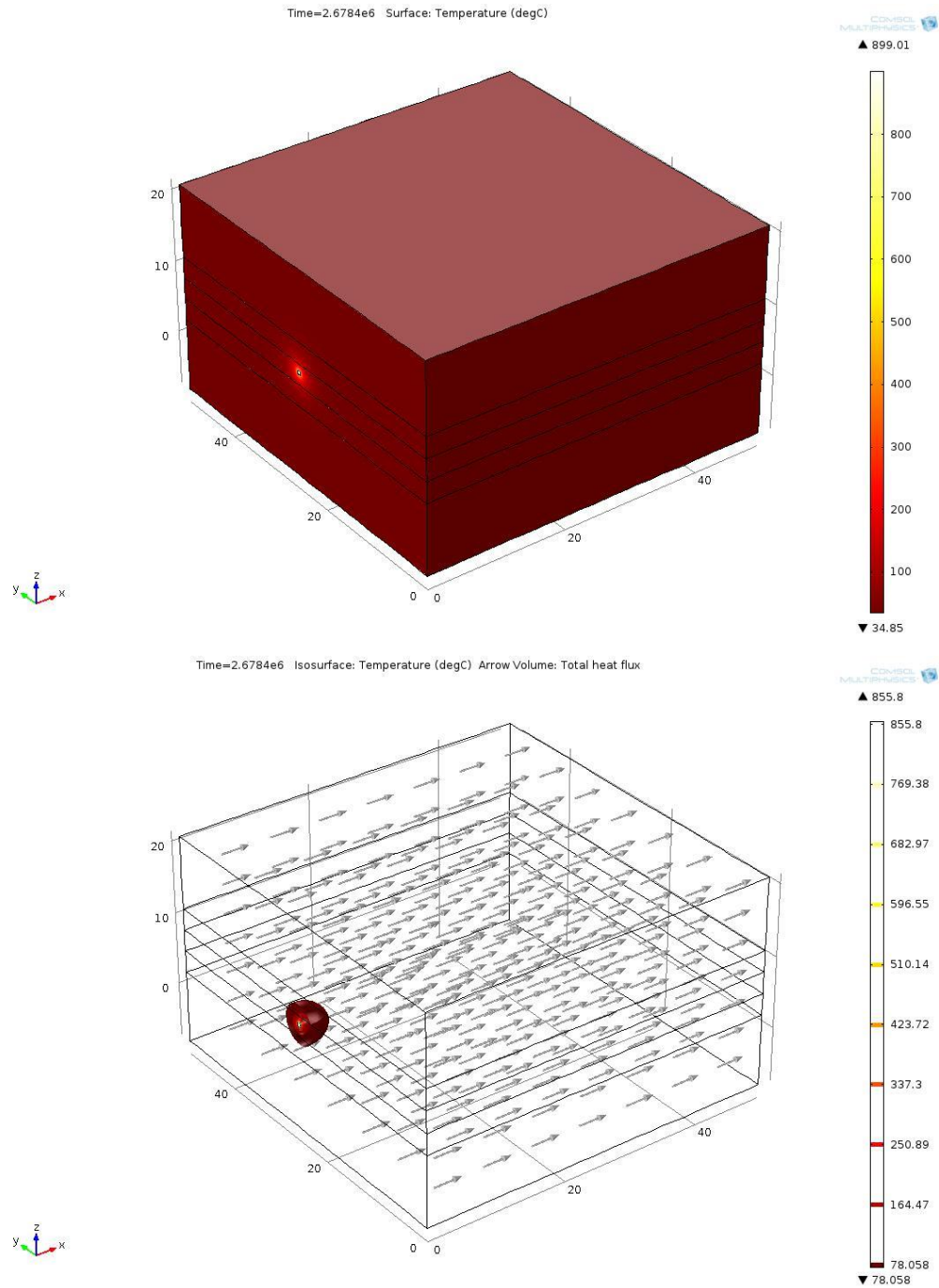
Figura 4-4. Escala de consumo de carbón dependiendo de las diferentes temperaturas que pueden tener los incendios.



Autor: elaboración propia con (OriginLab Corporation, 1992).

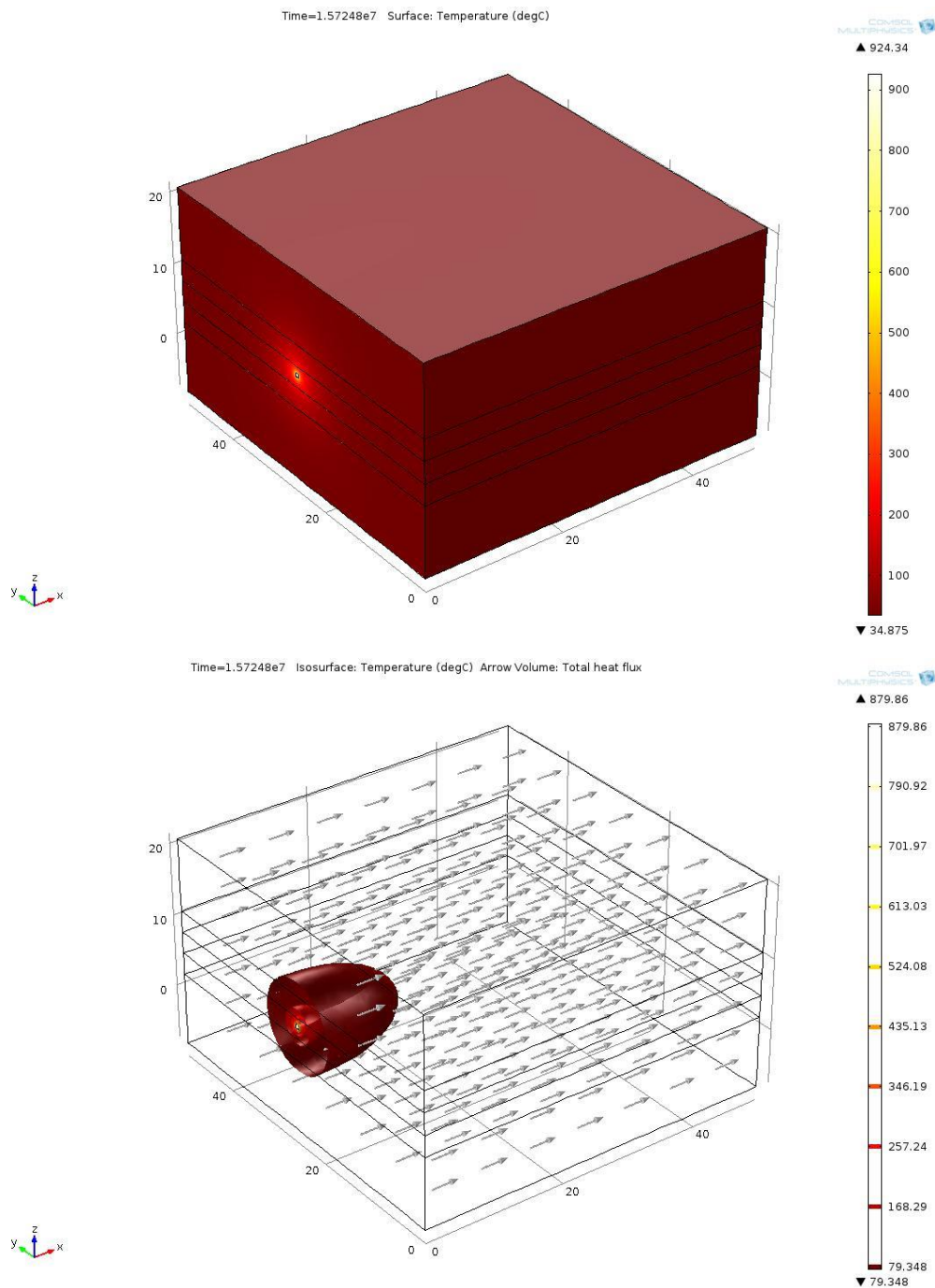
Las simulaciones de transferencia de calor se realizaron considerando dos escenarios de propagación: la primera aproximación es que el incendio se propaga a partir de un foco en el centro del manto de carbón, dicho escenario se realiza a partir de la suposición de que el incendio está en una etapa temprana de propagación y la segunda es que el incendio se propaga en toda la pared del manto de carbón, donde se encuentra en una etapa avanzada de propagación. El campo de velocidad promedio (\bar{u}) fue calculado a partir de ensayos de laboratorio sumado a los registros hechos en campo sobre diferentes incendios y se midió el avance a los 3 y 6 meses después del primer registro. Los resultados de las simulaciones de etapas tempranas se muestran en la Figura 30, Figura 31 y Figura 32 para los tiempos de 1 mes, 6 meses y 12 meses, respectivamente.

Figura 4-5. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isotermas dentro del cuerpo para 1 mes.



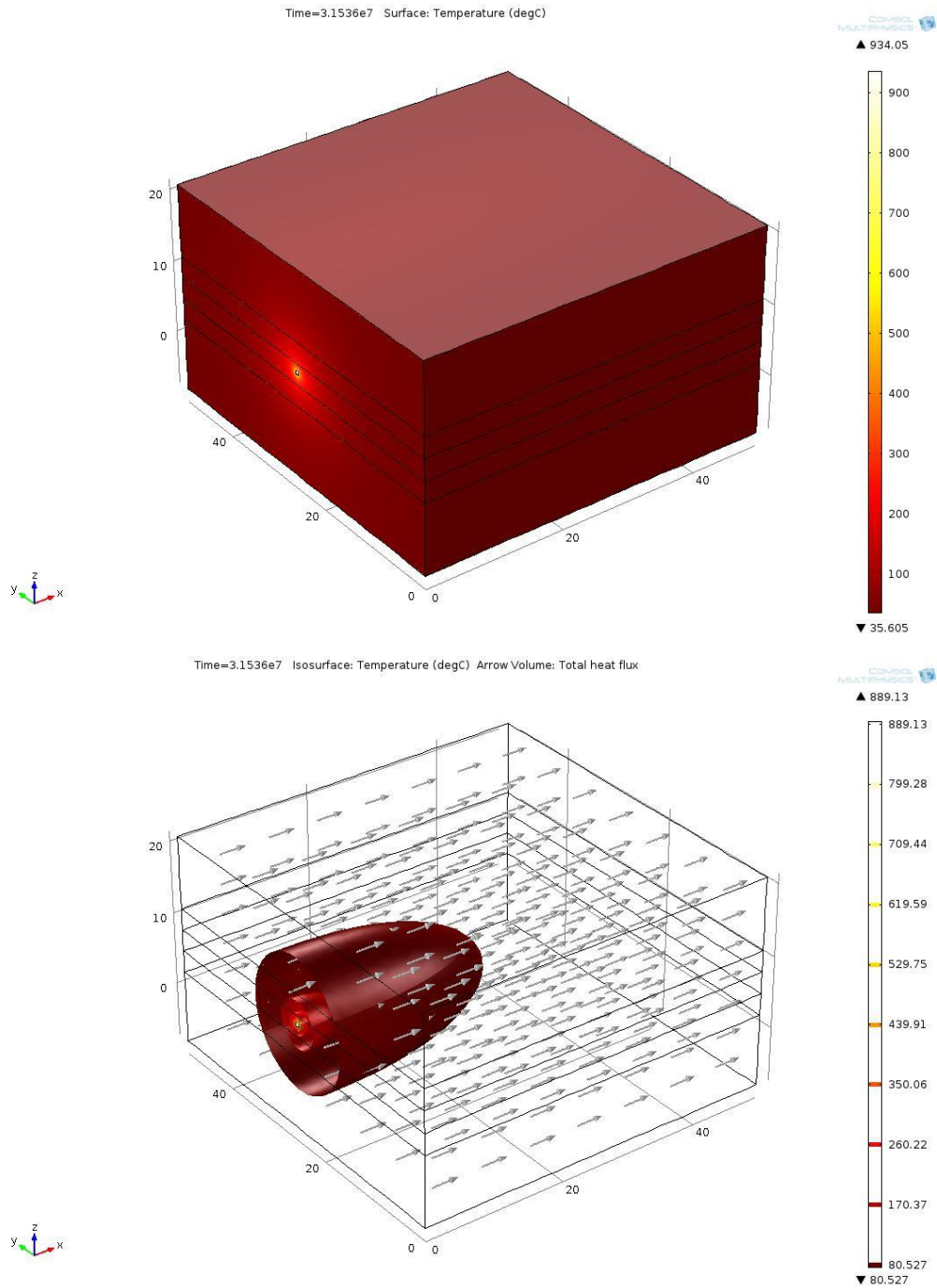
Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

Figura 4-6. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isotermas dentro del cuerpo para 6 meses.



Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

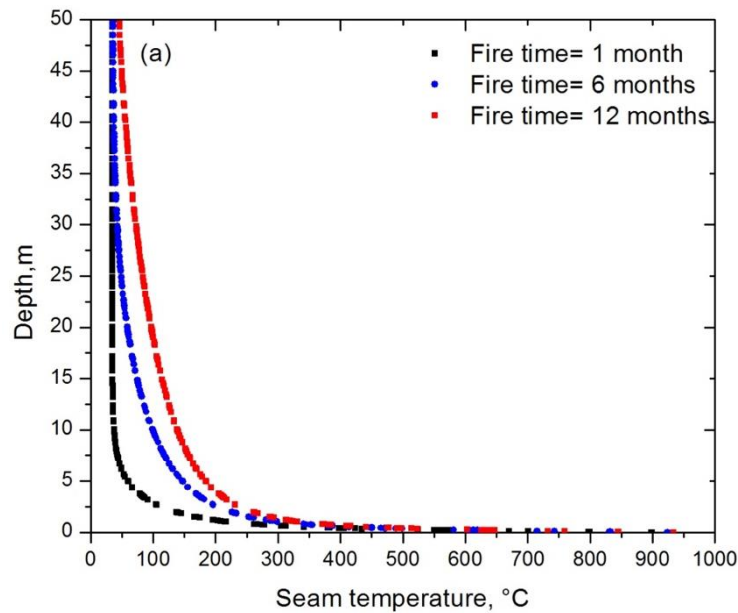
Figura 4-7. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isotermas dentro del cuerpo para 12 meses.



Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

Esta distribución se desarrolla de forma radial, afectando no solamente el manto de carbón, sino también los estratos superiores e inferiores. Se tiene que a medida que avanza el tiempo, el radio de influencia del foco con temperaturas mayores a 180 °C se incrementa producto de la transferencia de calor que se genera en el medio, alcanzando valores no superiores a 5 metros. Esta última depende de la capacidad calorífica y la conductividad térmica de las diferentes rocas que conforman la columna estratigráfica. La distribución de temperatura a lo largo del manto de carbón en profundidad se muestra en la Figura 4-8.

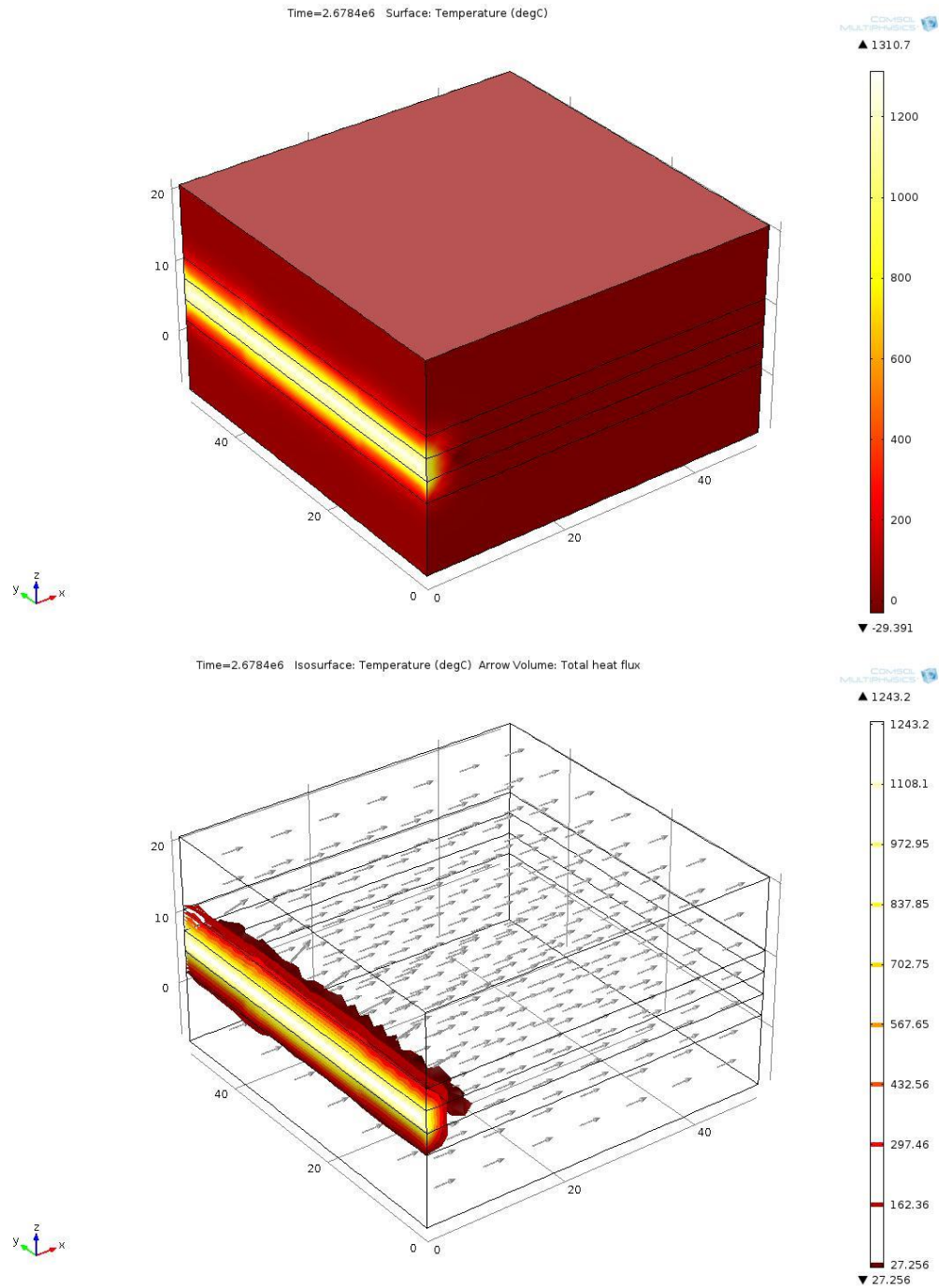
Figura 4-8. Comportamiento de la distribución de temperaturas dentro del manto en un foco de incendio.



Autor: elaboración propia con (OriginLab Corporation, 1992).

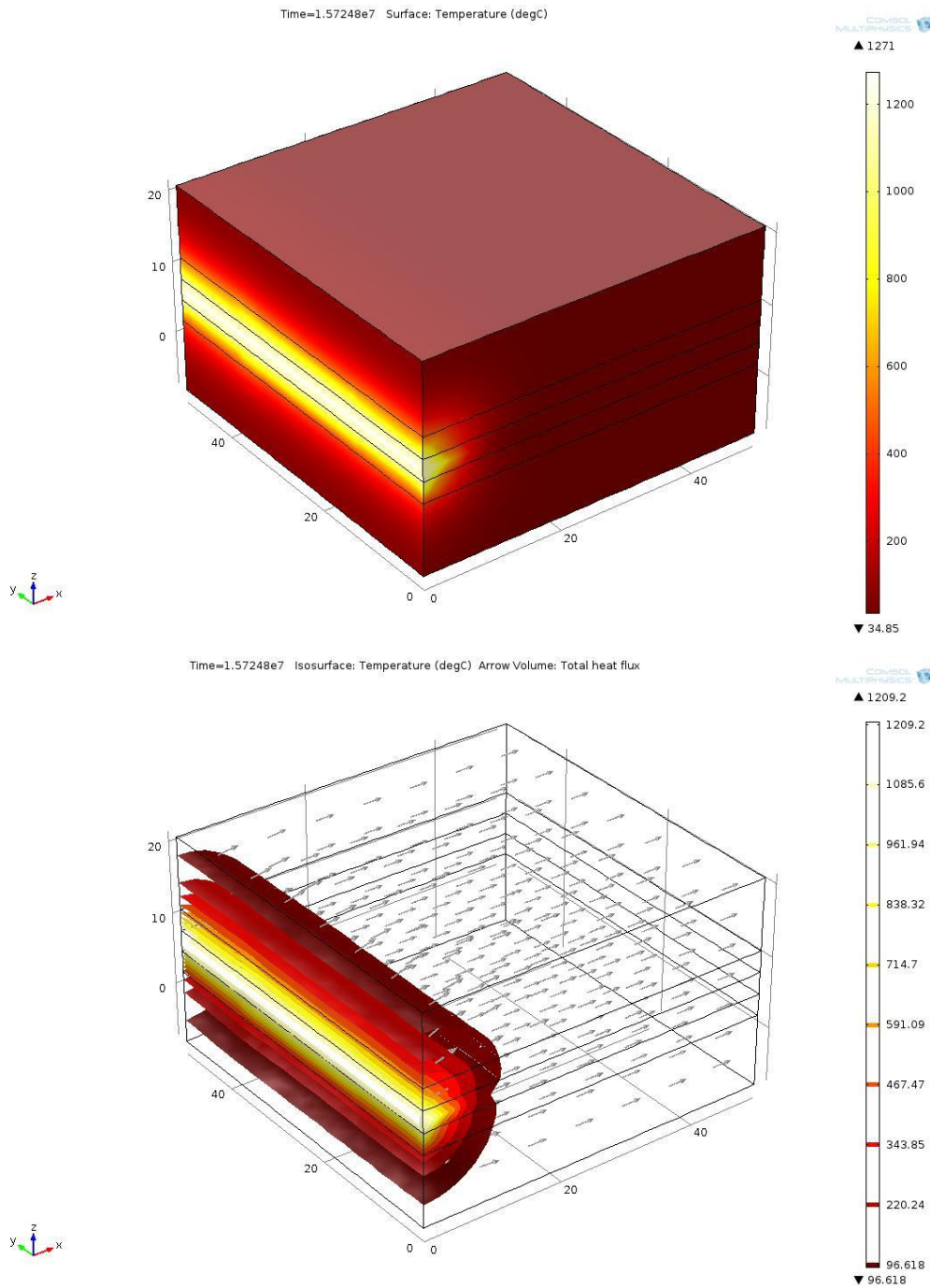
Los resultados de las simulaciones de etapas avanzadas de propagación se muestra en la Figura 4-9, Figura 4-10 y Figura 4-11 para los tiempos de 1 mes, 6 meses y 12 meses, respectivamente.

Figura 4-9. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isotermas dentro del cuerpo para 1 mes.



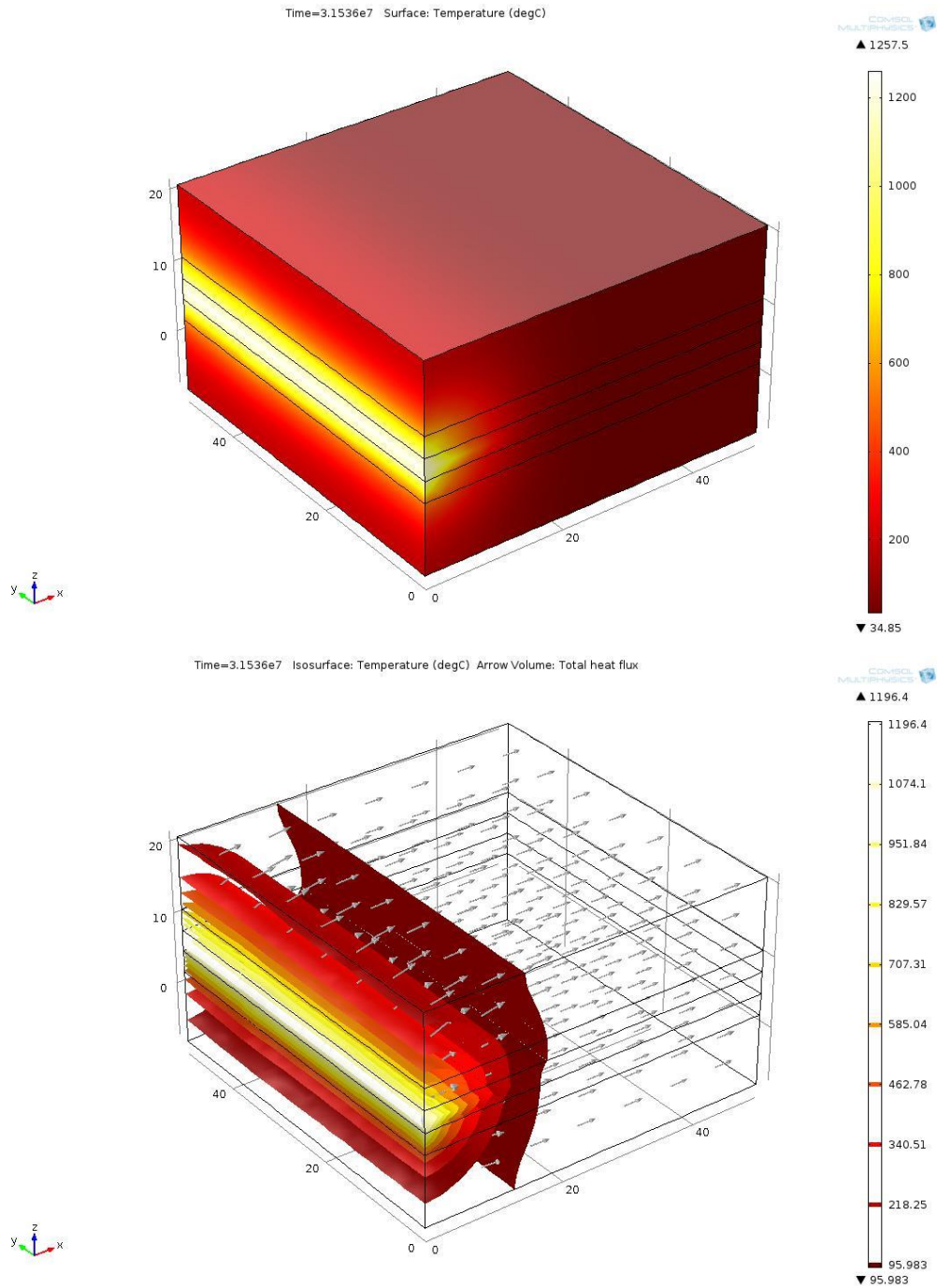
Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

Figura 4-10. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isoterma dentro del cuerpo para 6 meses.



Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

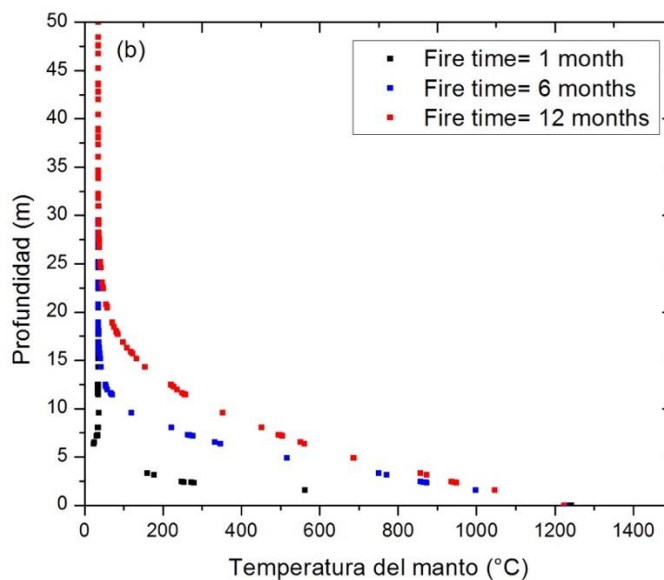
Figura 4-11. Primera imagen, resultado de la simulación según la distribución de la temperatura en la superficie del cuerpo, y segunda imagen distribución de isotermas dentro del cuerpo para 12 meses.



Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986).

En la Figura 4-12 se observa que la distribución de la temperatura se desarrolla de forma uniforme, afectando en igual medida los estratos superiores e inferiores. La transferencia de calor dependiendo del medio en este escenario no es tan notoria entre la arenisca y el conglomerado, tal como se observó en la simulación del foco, pero si se observa el impedimento de transferir el calor en estos estratos. En este caso la propagación de carbón no alcanzo los 15 metros en un año.

Figura 4-12. Comportamiento de la distribución de temperaturas dentro del manto en una pantalla de incendio.



Autor: elaboración propia con (OriginLab Corporation, 1992).

La pantalla completa tiene mayor cinética que la del foco porque tiene mayor cantidad de área para reaccionar. Demostrado en las simulaciones en COMSOL, por tal motivo los incendios en etapas tempranas de propagación, sí se extinguen de manera rápida se puede prevenir una mayor propagación a futuro, por eso la importancia de la correcta detección y caracterización de los incendios en la mina.

El campo de velocidad del macizo rocoso es una expresión analítica o un campo de una interfaz de flujo de fluido. Para determinar los intervalos posibles de dicho campo se consideran estudios previos hechos en campo, ensayos de laboratorio y calculados a partir del software COMSOL. De los cuales se obtuvieron los siguientes resultados como se observa en la Tabla 4-4.

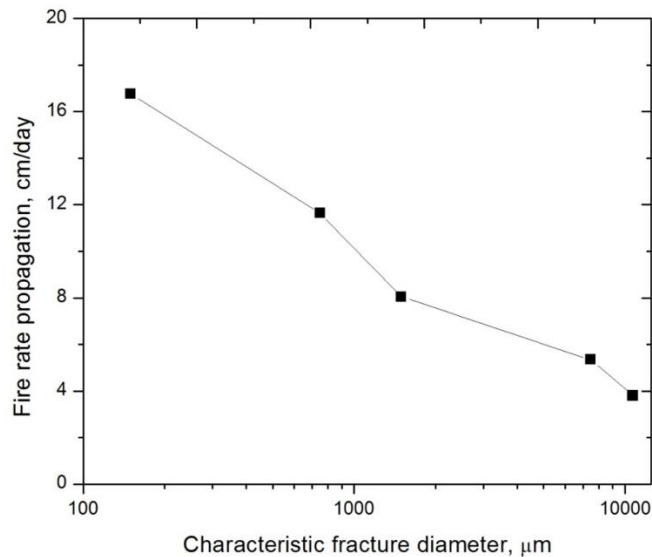
Tabla 4-4. Asociación entre los campos de velocidades y los diámetros de fracturas en las paredes.

Campo de velocidad en medio poroso(m/s)	Velocidad de propagación (m/s)	Dímetro de fractura (micrómetro)	Tipo de fractura en macizo y superficie
0.005	1.93929E-06	149.59	Fisura
0.001	1.34741E-06	747.98	Fisura
0.0005	9.3079E-07	1495.96	Fisura/Grieta
0.0001	6.18156E-07	7479.83	Grietas
0.00007	4.39019E-07	10685.48	Grietas

Autor: elaboración propia.

De lo anterior, se puede considerar que para campos de velocidades altos con valores de 0,005 y 0,001 m/s , los diámetros característicos de las facturas son alrededor de 149,59 y 747,98 micrómetros, respectivamente, asociando estos resultados a fisuras en el macizo. Por otro lado, para campos de velocidades bajos con valores entre 0,0001 y 0,00007 m/s , los diámetros característicos tienen valores de 0,75 cm y 1,07 cm, respectivamente, teniendo grietas para las paredes finales y tajos abandonados. Los cálculos de los diámetros de fractura se calculan a partir de la ecuación de Darcy (Lasseux & Valdés-Parada, 2017; Tanveer, Hayat, Alsaedi, & Ahmad, 2017), teniendo en cuenta la viscosidad del fluidos, la velocidad del campo (u), la presión sometida en el medio poroso y la permeabilidad de la roca. Para el caso del carbón se tiene una permeabilidad de 0.03 mD (Nelson, 1994). En la Figura 4-13 se muestra la relación que existe entre la propagación de los incendios con los diámetros característicos de fractura, donde se observa que macizos con fisuras la propagación es de 10-17 cm/día, esto sujeto a la reacción química, ya si las fracturas aumentar el diámetro característico la tasa disminuye, llegando a valores de hasta 4-8 cm/día, favorecido por la convección del aire en el carbón.

Figura 4-13. Tasa de propagación del incendio dependiendo de los valores de los diámetros característicos de las fracturas predominantes en el macizo rocoso.



Autor: elaboración propia con (OriginLab Corporation, 1992)

La transferencia de calor es más eficiente por conducción que por convección, ya que el aire tiene baja conductividad térmica, por lo tanto, si se tienen fisuras se promueve a la transferencia por conducción y reacción química y si se tiene grietas se promueve la transferencia por convección, esto se demuestra en la velocidad de la propagación y los de campos de velocidades registrados en las simulaciones en COMSOL y los ensayos hechos en el laboratorio.

4.6 Cálculo de la distancia de propagación en campo

El estudio de la propagación de los mantos en paredes altas y los tajos abandonados en la mina, se describió bajo ecuaciones de conservaciones de la energía, de las especies y de la continuidad de los cuales se obtuvo la velocidad de propagación dependiendo del tipo de fisuras del macizo rocoso y el consumo volumétrico de carbón según la temperatura del incendio, pero es de suma importancia describir la distancia máxima alcanzada aproximada de los incendios juntando los resultados de los modelos anteriores. Se sabe que los incendios de carbón no alcanzan los 150 metros de profundidad (Kuenzer et al., 2007), Por debajo de esta profundidad, los incendios no reciben suficiente oxígeno para mantener la combustión o el agua subterránea está presente ahogando el incendio. El ángulo de

buzamiento del manto es fundamental a la hora de determinar la distancia máxima alcanzada en el manto de carbón en superficie. Dicha distancia aproximada se puede observar en la Tabla 4-5.

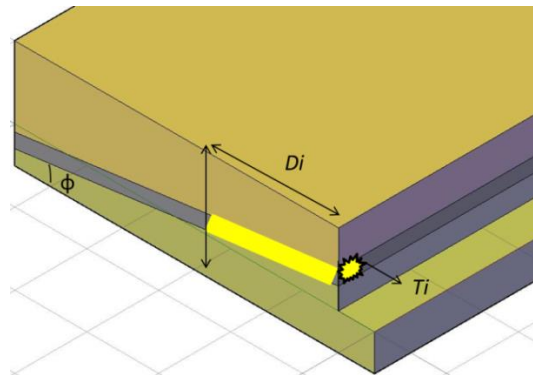
Tabla 4-5. Ecuaciones para el cálculo de la distancia de propagación del incendio en superficie según el tipo de fractura.

Tipo de fractura	Ecuación
Fisuras	$Di[m] = \cos \phi \left(2,41 \times 10^6 e^{\frac{-Ti[^\circ C]}{3,07}} + 18,9 \right) \quad (35)$
Fisura/Grietas	$Di[m] = \cos \phi (5,46 + 590,26Ti[^\circ C]^{-0,78}) \quad (36)$
Grietas	$Di[m] = \cos \phi (116,3 - 0,05Ti[^\circ C]) \quad (37)$

Autor: elaboración propia.

Donde Di es la distancia desde el frente hasta la extensión del incendio en superficie, Ti es la temperatura medida en el frente, correspondiente a la temperatura máxima medida en superficie por la cámara termográfica o pistola térmica y ϕ equivale al valor del buzamiento del manto de carbón. El esquema se puede ver en la Figura 4-14.

Figura 4-14. Variables por considerar en la distancia del incendio en superficie según los médelos descritos.



Autor: elaboración propia.

5. Método para extinción de los incendios

Como se mencionó con anterioridad, la compañía implementa en su operación medidas para el control y extinción de los incendios. Se establecieron algunas propuestas de mejoramiento de los métodos actuales como se describen en la Tabla 2-5, teniendo en cuenta las observaciones realizadas de los distintos procesos durante las visitas de campo.

5.1 Remoción

La remoción consiste en la construcción de una rampa para acceder al incendio y talucear la pared del manto de carbón prendido. Se procede a combatir el manto de carbón prendido con un ángulo de 45 grados o menos, y en sentido contrario de las emisiones de gases, evitando la caída o desprendimiento de carbones encendidos y rocas sueltas, protegiendo la integridad del operador, y se continúa con la remoción hasta que haya desaparecido el material caliente. Actualmente en la compañía, se maneja la metodología 20/20 en el proceso de remoción en el control de incendios, la cual permite al operario de la retroexcavadora trabajar 20 minutos y descansar el mismo tiempo, debido a las altas temperaturas que se tienen en el frente de trabajo. Esto es indispensable, ya que, si se excede este tiempo de trabajo, puede generar efectos adversos tanto en la salud del operario como daños en la máquina.

La propuesta consiste en la adaptación de dos tanques de agua interconectados de un metro cúbico en el contrapeso de la retroexcavadora de brazo largo y a su vez la instalación de la bomba Wilden PX4, los cuales estarán conectados a un sistema de mangueras que debe ir superpuesta a la manguera hidráulica de la retroexcavadora y se extenderá hasta donde empieza la cuchara de la máquina, ubicándose en la parte de abajo. Las mangueras para la aspersion de agua deben presentar boquillas de nebulización ya que es más eficaz si se emplea pulverizada porque al evaporarse de una manera más rápida absorbe más calor, de tal manera que se pueda abarcar una mayor área del incendio y se mejore la distribución del agua. En la Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 se observa el sistema propuesto para mejorar el proceso de remoción.

Figura 5-1. Vista lateral de la retroexcavadora brazo largo con adaptación de sistema de enfriamiento.

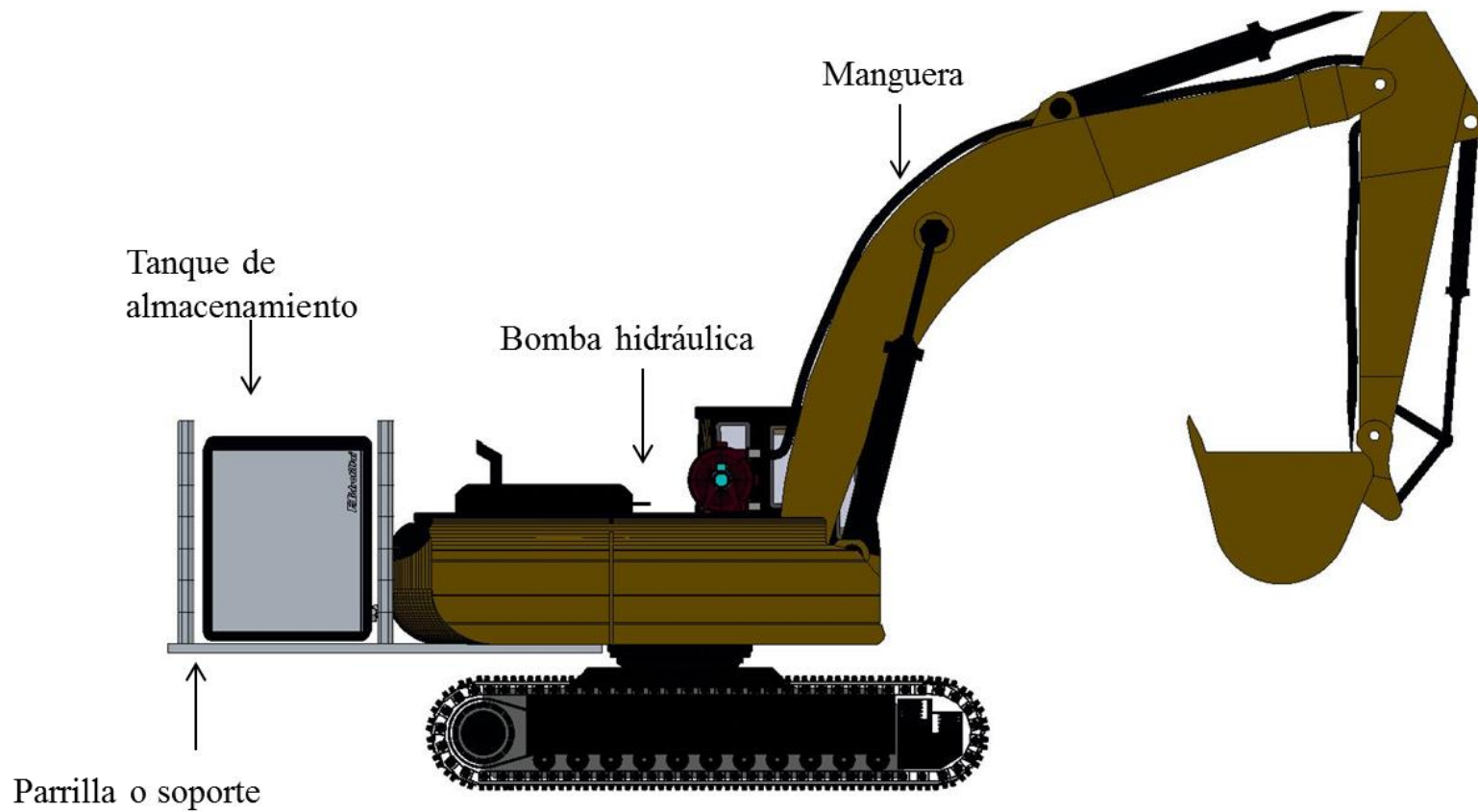


Figura 5-2. Vista isométrica de la retroexcavadora brazo largo con adaptación de sistema de enfriamiento.

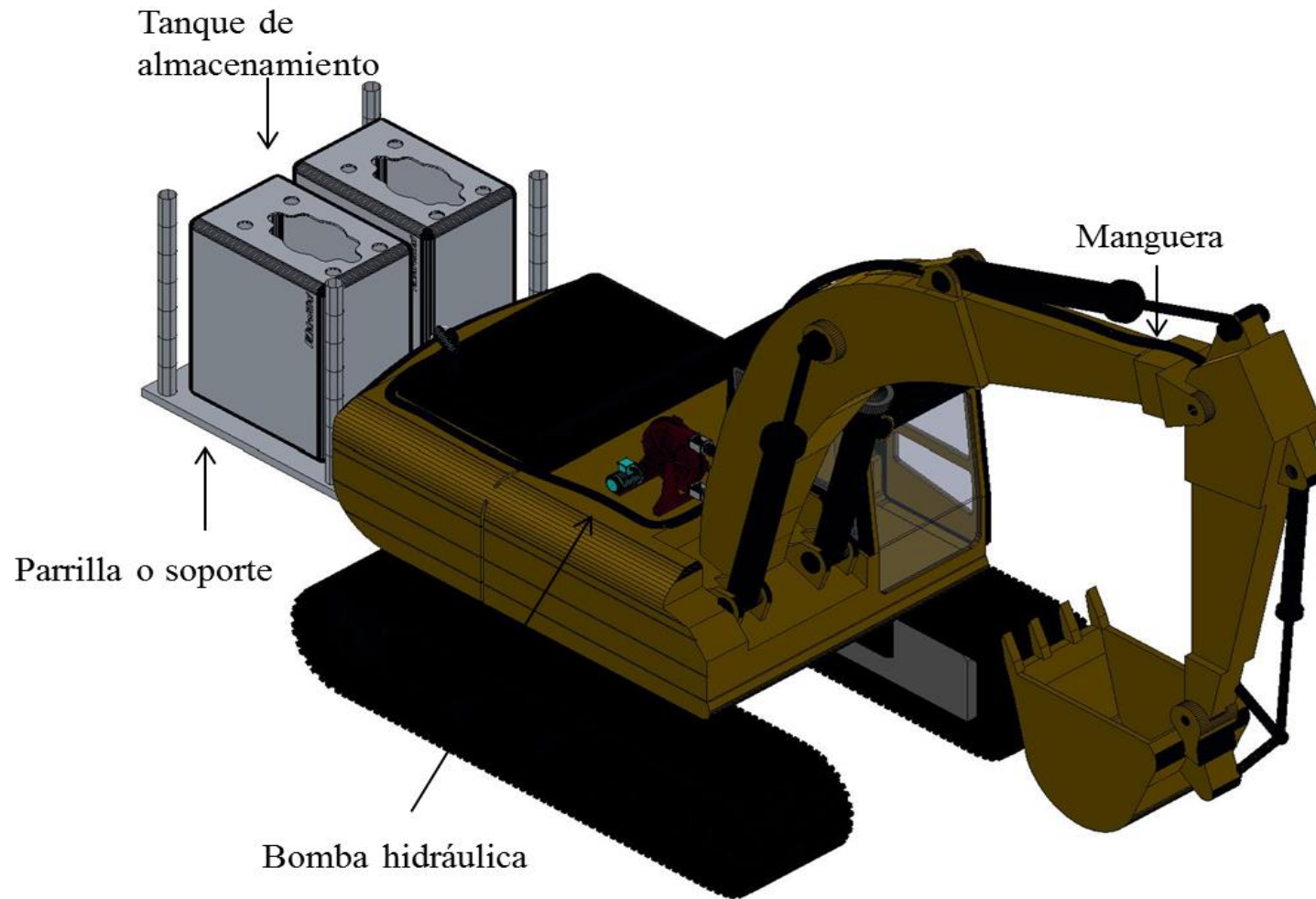
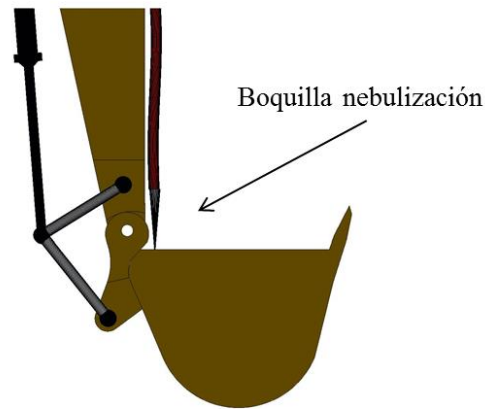


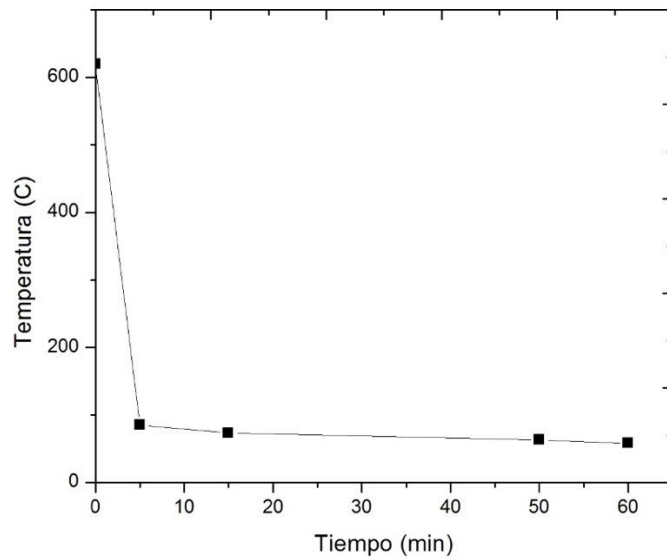
Figura 5-3. Cuchara con adaptación de boquilla nebulizadora.



Autor: elaboración propia con (Autodesk Inc., 2017)

Con este sistema se busca que el operario de la máquina pueda trabajar continuamente en el incendio, ya que mientras va realizando el proceso de remoción a su vez adiciona agua en el frente de trabajo, disminuyendo la temperatura del mismo. De esta manera se mejora la metodología 20/20 y se optimiza el tiempo de trabajo para la extinción de incendios.

De acuerdo con pruebas realizadas en la mina, se tiene evidencia que con un caudal de 10 litros/minutos de agua, durante un tiempo de 5 minutos se logra la reducción de la temperatura de un incendio de 600 a 100 °C aproximadamente. En la Figura 5-4 se tiene el resultado de una de las pruebas realizadas en la compañía con agua para enfriar el frente de trabajo. Teniendo en cuenta este caudal y las capacidades de los tanques, se calcula el tiempo con el que podría trabajar de forma continua la máquina adicionando agua en el frente. En la Tabla 5-1 se presenta el resumen de los parámetros para el sistema de inyección de agua implementado en la retroexcavadora de brazo largo.

Figura 5-4. Temperatura vs tiempo de aplicación de agua en el incendio.

Autor: elaboración propia con (OriginLab Corporation, 1992).

Tabla 5-1. Parámetros para la aplicación de agua en los frentes incendiados.

Parámetros	Valor	unidades
Capacidad de los 2 tanques	2000	litros
Caudal de salida	10	litros/minuto
Tiempo de aplicación continua	200	minutos

Autor: elaboración propia.

5.2 Sofocación

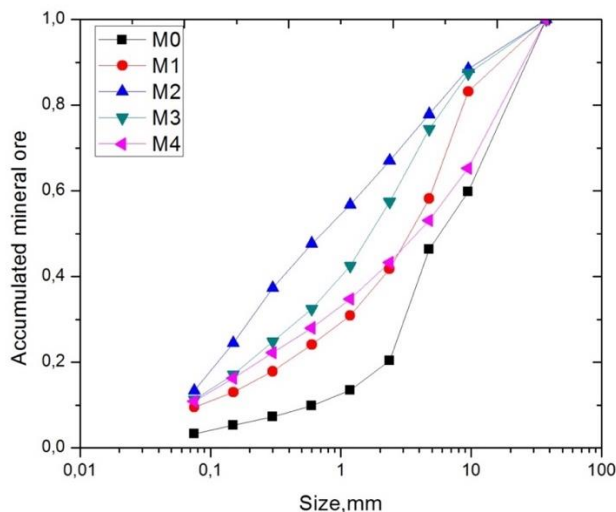
La sofocación consiste en la descarga de material estéril meteorizado sobre el área afectada con camiones de estéril, el objetivo principal es impedir la difusión de oxígeno o contradifusión de CO y CO₂., pero en algunas ocasiones, aunque se realice la práctica, el material seleccionado no cumple con las características apropiadas y tiempo después vuelve aparecer los humos de la combustión, generando un costo de movimientos de material y deposición que se pierde. Por lo anterior, se describen los criterios que se deben tener en cuenta para la selección del material: (1) Granulometría y tipo suelo, ya que esta es indispensable para medir la distribución de tamaños de partículas en un medio. Para esto se requiere previamente un muestreo, en el cual se pueda obtener una fracción pequeña que sea representativa de un total del mineral que se desea analizar. Por otro lado, se requiere un tamizaje que permita la separación de un sistema de partículas de acuerdo a su tamaño, mediante tamices. Cada grupo de tamaño obtenido se caracteriza por la existencia de un rango

relativamente estrecho de tamaño entre las partículas mayores y las más estrechas del grupo (Instituto de minerales CIMEX, 2015). (2) Grado de compactación del material, para esto fue necesario realizar pruebas de compactación (Proctor), ya que es uno de los ensayos más importantes en el estudio y control de calidad de la compactación de un terreno. A través de este ensayo es posible determinar la densidad seca máxima de un terreno en relación con su grado de humedad a una energía de compactación determinada (Kyser & Ravichandran, 2016).

5.2.1 Granulometría y tipo suelo

Se analizaron 4 muestras de diferentes suelos provenientes de la mina Cerrejón con la finalidad de comparar que suelo presenta mejores características para la compactación. A cada una de estas muestras se le realizó una distribución de tamaño de partículas como se evidencia en la Figura 5-5, obteniéndose la fracción de pasante acumulado.

Figura 5-5. Fracción de pasante acumulado vs tamaño de grano.



Autor: elaboración propia con (OriginLab Corporation, 1992)

Según la clasificación de suelos se obtuvo que las muestras anteriores pertenecen al grupo de suelos de grano grueso que corresponden a gravas y arenas, debido a que más del 50% del material es retenido de la malla 200 (0,075 mm) de la serie Tyler. En la Tabla 5-2 se presenta la clasificación de cada una de las muestras de acuerdo con la distribución de tamaño de partículas.

Tabla 5-2. Clasificación USCS para las diferentes muestras de estudio.

Muestra	Clasificación USCS	Denominación de los suelos
M0	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arenas con pocos finos o sin ellos.
M1	SP	Arenas mal graduadas, arena con grava o pocos finos o sin ellos.
M2	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arenas y arcillas mal graduadas.
M3	SM	Arenas limosas, mezcla de arenas y limos mal graduadas
M4	SM-SC	Mezcla por límites que se solapan.

Autor: elaboración propia

A partir del método de ponderación por puntos se busca determinar el tipo de suelo que proporciona mejores propiedades para la sofocación al ser compactado. Para esto se definieron 4 criterios con las propiedades más relevantes de interés para el estudio y cada muestra se sometió a esta evaluación, asignándoles una calificación de acuerdo con sus características. En la Tabla 5-3 se presentan los criterios utilizados para evaluar los diferentes tipos de muestras.

Tabla 5-3. Criterios de evaluación utilizados para la aplicación del método de ponderación por puntos.

Propiedades más importantes en la sofocación con suelos	Calificación
1. Permeabilidad en estado compactado	
Impermeable	5
Semi impermeable	3.75
Permeable	2.5
Muy permeable	1.25
2. Resistencia al corte en estado compactado y saturado excelente	
Excelente	5
Buena	4
Regular	3
Deficiente	2
Insuficiente	1
3. Compresibilidades en estado compacto y saturado	
Muy alta	1
Alta	2
Despreciable	3
Baja	4

Propiedades más importantes en la sofocación con suelos	Calificación
Muy baja	5
4. Facilidad de tratamiento en obra	
Excelente	5
Buena	4
Regular	3
Deficiente	2
Insuficiente	1

Autor: elaboración propia

Los resultados de la ponderación se presentan en la Tabla 5-4 de acuerdo con las características de cada suelo.

Tabla 5-4. Resultados de la ponderación por puntos para cada una de las muestras de suelo.

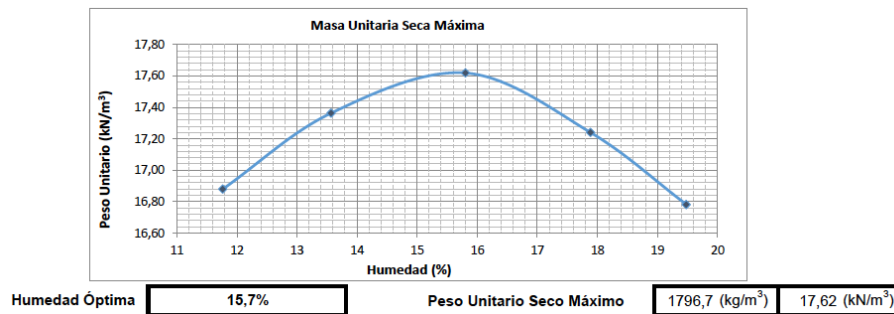
Suelo	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Total
SM	4,4	4	4	3	15,3
SC	5	3,5	4	4	16,5
GS	2,5	5	3	3	13,5
SP	2,5	4	5	3	14,5
SC-SP	4,7	3,75	4	3,5	15,9

Autor: elaboración propia

Por lo anterior se escoge la muestra M2 al tener la mayor calificación en la ponderación por punto como el suelo que presenta las mejores propiedades al momento de la compactación en el proceso de sofocación. Por lo tanto, se realizó el ensayo de compactación Proctor para la muestra seleccionada.

5.2.2 Grado de compactación

Según los resultados del grado de compactación del suelo anteriormente seleccionado se tiene que la humedad óptima se muestra en la Figura 5-6. Los resultados completos se pueden observar en el Anexo 3.

Figura 5-6. Masa unitaria máxima seca.

Autor: elaboración propia.

Lo que demuestra que el suelo estudiado tiene propiedades de plasticidad media y consistencia firme que ayuda al propósito de la sofocación en la operación minera.

5.3 PROPEX

El PROPEX es una técnica única a nivel mundial para controlar los mega incendios producidos en superficie por el fenómeno de combustión espontánea de carbón, permitiendo la extinción desde superficie debido al aprovechamiento de las estructuras geológicas, cavernas producidas por la ceniza de combustión, las cuales presenta baja resistencia mecánica en comparación de los otros estratos sedimentarios y en la sumersión utilizando un material de gran flujo de extinción, desarrollando una fuerte cobertura y asfixia para la zona de incendio a gran escala.

En términos generales, la técnica consiste en la inyección de una suspensión a presión suficiente para llegar al incendio e invadir el área afectada. De esta manera se crea un canal altamente conductivo que facilita el flujo de la suspensión desde la superficie hasta el incendio (ver Figura 5-11). Con el fin de garantizar el éxito del tratamiento, es necesario llevar a cabo un estudio geomecánicos y de presiones del macizo rocoso que sea certero. Una prueba de presiones es una herramienta de diagnóstico basada en las necesidades específicas de cada pozo que permite evaluar los parámetros del fracturamiento y facilita la selección del producto a inyectar; todo esto con la finalidad de lograr un apagado exitoso.

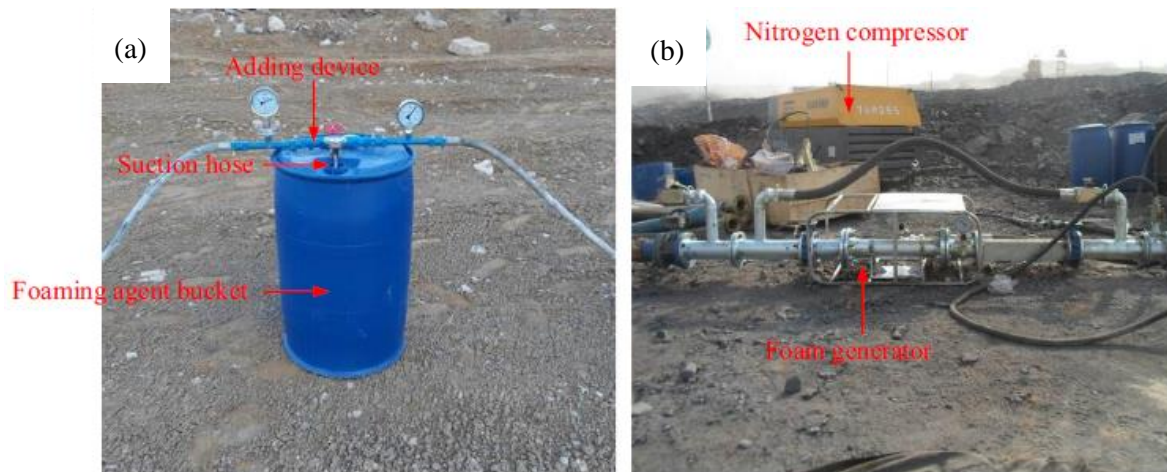
5.3.1 Producto

Espuma líquido-gas

Las espumas líquido-gas consiste en la mezcla de nitrógeno, agua y un agente espumante que aplica el principio absorción de calor del incendio y reduciendo drásticamente la temperatura, llevándolo a la extinción. Esta espuma tiene ventajas de gran flujo, gran expansibilidad y buena fluidez en las cavidades y las estructuras del macizo.

El procedimiento para la preparación de la espuma líquido-gas es el siguiente: primero, se agrega el agente espumante a la tubería de agua a través de un dosificador (ver Figura 5-7a), formando una mezcla líquida de espuma. En segundo lugar, la mezcla se combina con nitrógeno comprimido en un generador de espuma para producir espumas (ver Figura 5-7b). En tercer lugar, la espuma preparada se transporta en orificios de perforación múltiple mediante una distribución de espuma (ver Figura 5-11) la cual se inyecta a la zona de incendio de carbón (X. Lu et al., 2015).

Figura 5-7. (a) esquema de agente espumante, manguera de succión y dosificador. (b) Compresor de nitrógeno y generador de espuma.



Autor: (X. Lu et al., 2015)

La Figura 5-8 se ilustra la espuma preparada utilizada para la extinción de incendios de carbón. En la Tabla 5-5 se presentan las condiciones de preparación y funcionamiento de la espuma, para un área de influencia de un mega incendio.

Tabla 5-5. Condiciones óptimas de funcionamiento del sistema de formación de espuma.

	Caudal	Presión
Agua	4 m ³ /hora	1,2 MPa
Nitrógeno	400 m ³ /hora	0,2 MPa
Agente espumante	50 kg/hora	-

Autor: (X. Lu et al., 2015)

Figura 5-8. Espuma preparada para la extinción de los incendios a gran escala.

Autor: (X. Lu et al., 2015)

El tiempo de estabilidad de las espumas se registra hasta que la espuma de expansión desaparece por completo en el tanque de espuma. Se ha estudiado de acuerdo con las condiciones anteriores que la cantidad de producción de espuma es de aproximadamente 340 – 360 m³/h, y la relación de expansión de espuma es 85-90 veces. El tiempo de estabilidad de las espumas es aproximadamente 11-12 horas (X. Lu et al., 2015).

Espuma trifásica

La espuma trifásica está compuesta de un material no combustible (partículas finas, arcillas o clinker molido), un gas inerte (nitrógeno) y agua, que son materiales efectivos para controlar incendios. En primer lugar, el agente espumante se añade a la suspensión conformada por arcilla y agua y posteriormente se inyecta gas nitrógeno. A través de la agitación mecánica desarrollada por el generador de espuma, el medio de múltiples fases se forma con partículas de la suspensión unidas a la superficie de la burbuja de forma equitativa. Este medio multifase se denomina espuma trifásica. Una gran cantidad de espuma trifásica se forma después de adicionar nitrógeno en la suspensión que

contiene agente espumante; aumentando bruscamente el volumen de la espuma. Esta puede apilarse sobre sí misma, lo que ayuda a cubrir completamente el área del incendio en todo el carbón. El nitrógeno encapsulado en la espuma contribuye a extinguir el incendio debido a que este permanece un tiempo prologando sobre el área intervenida. La suspensión compuesta con una proporción de arcilla a agua de 1:8 se prepara en el tanque de mezcla de suspensión. La suspensión preparada se bombea hacia el otro tanque o generador de espuma al igual que el agente espumante proveniente del dosificador. Esto se realiza a partir de una bomba volumétrica de tornillo a través de una tubería donde ambos productos se mezclan completamente y se introducen al generador de espuma. Se añade gas nitrógeno al generador de espuma a través de un tubo de caucho, permitiendo la formación de la espuma de tres fases después de la interacción entre el gas y la suspensión espesa. Finalmente, la espuma trifásica se suministra a la zona del incendio a través de las tuberías que se introducen en los pozos de perforación (Wan-Xing et al., 2011), todo este proceso se puede ver en la Figura 5-11. Los parámetros técnicos para la aplicación de la espuma trifásica se expresan en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6. Parámetros técnicos para la aplicación de la espuma trifásica

Cantidad de suspensión (m ³ /h)	Relación material/agua	Cantidad de aire (m ³ /h)	Tasa de consumo de agente espumante (t/h)
20	1:8	600	0,1

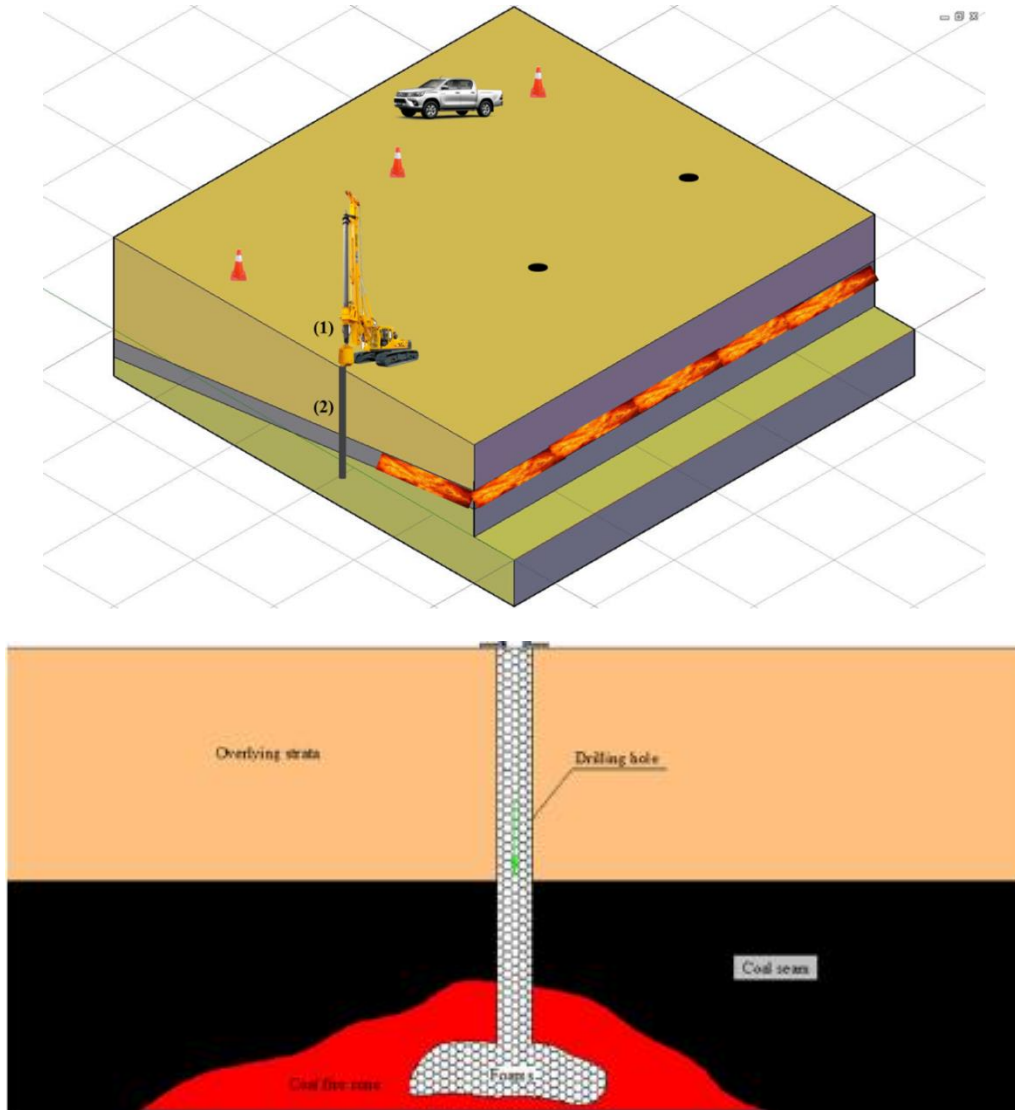
Autor: (Wan-Xing et al., 2011)

5.3.2 Metodología

Perforación

La perforación de la propuesta es fundamental porque es la que permite la creación del pozo, en donde se va a inyectar el producto para la extinción del incendio, en la Figura 5-9 se muestra el esquema general.

Figura 5-9. Esquema general de la perforación para la propuesta PROPEX. (1) Perforadora (2) Pozo de inyección de espuma trifásica.

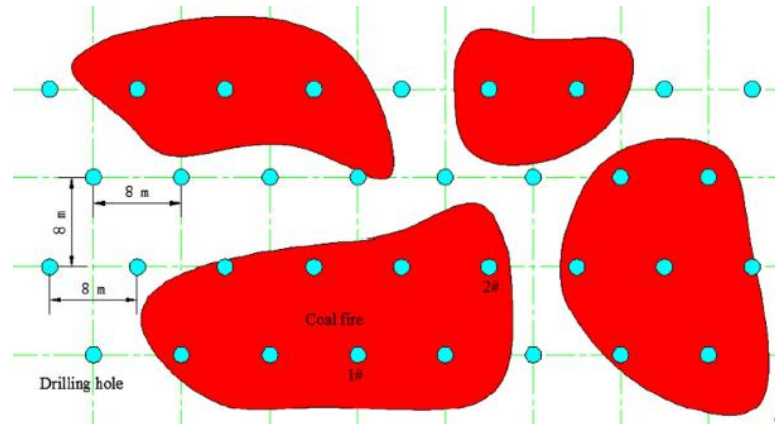


Autor: elaboración propia y (X. Lu et al., 2015)

- **Estudios previos:** antes de realizar la metodología PROPEX, se debe contar con estudios hidrogeológicos, geomecánicos, estructurales y ensayos de permeabilidad en el medio poroso. También, conocer la etapa de propagación del incendio teniendo en cuenta su distancia máxima en superficie (D_i) y la profundidad del manto incendiado mediante la observación del relieve y si es posible, a través de perforaciones de sondeo. A partir de estas perforaciones se busca generar una malla que permita caracterizar el incendio a profundidad

identificando el hogar del mismo, mediante la medición de temperatura y concentración de gases de combustión (ver Figura 5-10).

Figura 5-10. Perforaciones de sondeo para la determinación de las zonas de influencia del incendio.



- **Criterios de selección de sitios de perforación:** tener el dimensionamiento adecuado como mínimo de 20x20 m para albergar todas las instalaciones que sean necesarias, tales como: caseta de control, pozo, tanques, equipos, etc. Acceso al terreno que permita la entrada de maquinaria y equipos para la planta de bombeo y condiciones de seguridad para las personas que van a trabajar en esa zona. Rodear el área afectada por el incendio en superficie y diseñar la malla de perforación.
- **Pre diseño del pozo:** el pre diseño del pozo se tiene a partir de los estudios previos que se realizaron en el lugar de incidencia del incendio, a partir del cual se debe estimar la profundidad del incendio, diámetro de perforación, perfil litológico, método de perforación, dimensiones mínimas del terreno que albergara la perforación y tipo de revestimiento.
- **Método de perforación:** será necesario estudiar alternativas para el método de perforación y construcción con la intención de que los pozos puedan ser construidos lo más económicamente posible en concordancia con las características geológicas, pre diseño del pozo, materiales con que se cuente, etc.
- **Construcción del pozo:** la construcción del pozo se concebirá de acuerdo a las siguientes etapas: perforación, instalación de ademe, instalación filtro de grava y el desarrollo para obtener una inyección a un rendimiento máximo. Los agujeros deberán ser perforados hasta

alcanzar las profundidades y características físicas señaladas en los estudios previos y en el pre diseño.

- **Diámetro de perforación:** las perforaciones deberán realizarse de tal manera que cumplan con las características contenidas en el pre diseño del pozo. Si se llegan a encontrar formaciones con pérdidas de fluido durante la perforación, se deberán tomar las medidas correspondientes para asegurar que la perforación pueda continuar a través de la formación con pérdidas de fluido sin afectar la zona de producción.

Tabla 5-7. Diámetro nominal de revestimiento y diámetro de perforación.

Diámetro nominal del revestimiento		Diámetro de perforación	
(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)
152,4	6	254-311,15	10-12 1/4
203,2	8	311,15-374,65	12 1/4-14 3/4
254	10	374,65-444,5	14 3/4-17 1/2
30,4	12	444,5-508	17 1/2-20
355,6	14	508-584,2	20-23
406,4	16	584,2-660,4	23-26
457,2	18	660,4-762	26-30
508	20	762-863,6	30-34

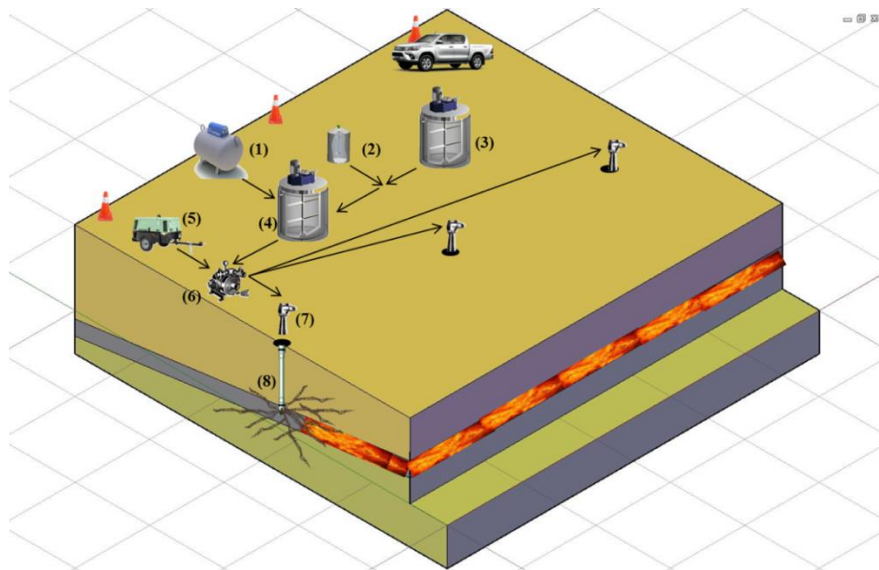
Autor: (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2015)

- **Sello de fondo:** En el extremo inferior de la tubería/rejilla deberá colocarse cualquiera de las siguientes alternativas: Un cono de sedimentación de diámetro igual al ademe y de 50 centímetros de longitud. Cerrarse con un tapón de concreto de diámetro igual al ademe y 50 centímetros de longitud.

Inyección

Posterior a la perforación y creación del pozo, la inyección es la siguiente etapa del procedimiento, donde se tienen que tener una serie de equipos fundamentales para que se pueda dar. Los equipos se describen en la Figura 5-11.

Figura 5-11. Esquema general de la inyección para la propuesta PROPEX. (1) Tanque de almacenamiento de nitrógeno (2) dosificador de agente espumante (3) tanque de agitación para la preparación de la suspensión (4) tanque de mezcla final de la espuma trifásica (5) compresor de aire (6) bomba de presión de lodos (7) cabeza de inyección (8) tubo de revestimiento.



(7)

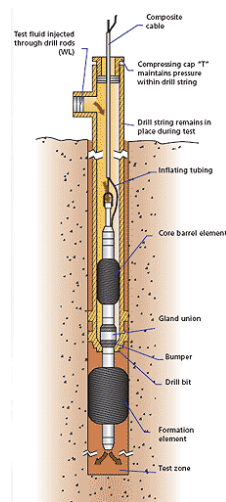


Autor: elaboración propia y (X. Lu et al., 2015)

Para desarrollar la inyección de la espuma trifásica sobre el manto de carbón, de tal manera que se evite la propagación del incendio, se deben realizar pozos de perforación cerca de del mismo. Previamente se debe haber delimitado la zona que abarca el incendio para conocer su extensión y la forma en que se puede atacar. Se debe colocar una fila de pozos de acuerdo con la extensión del incendio hasta cubrirlo totalmente. Después de completar la perforación, se coloca un tubo de acero con determinado diámetro en el pozo de acuerdo a los estudios previos (Wan-Xing et al., 2011).

Posteriormente, se procedió a la inyección de la espuma de forma continua sobre el manto de carbón a través del tubo instalado sobre cada pozo. La espuma se acumula rápidamente, formando una barrera que impide la propagación del incendio en el manto de carbón, y a su vez el nitrógeno contenido en la espuma trifásica contribuye ahogando el incendio y extinguiéndolo. Para monitorear el estado del incendio, se realizará una perforación adicional que permita introducir un Wireline como se observa en la Figura 5-12 con sensores de concentración de monóxido de carbono (CO) y de dióxido de carbono (CO₂). La tecnología Wireline consiste en usar un cable para bajar equipos o dispositivos de medición a un pozo y obtener información del mismo (Miah, 2014; Roslin & Esterle, 2016). A medida que el incendio es controlado, disminuye la concentración de CO en el interior del macizo hasta que se extingue completamente.

Figura 5-12. Tecnología Wireline implementada en pozos de perforación.



Autor: (Roslin & Esterle, 2016)

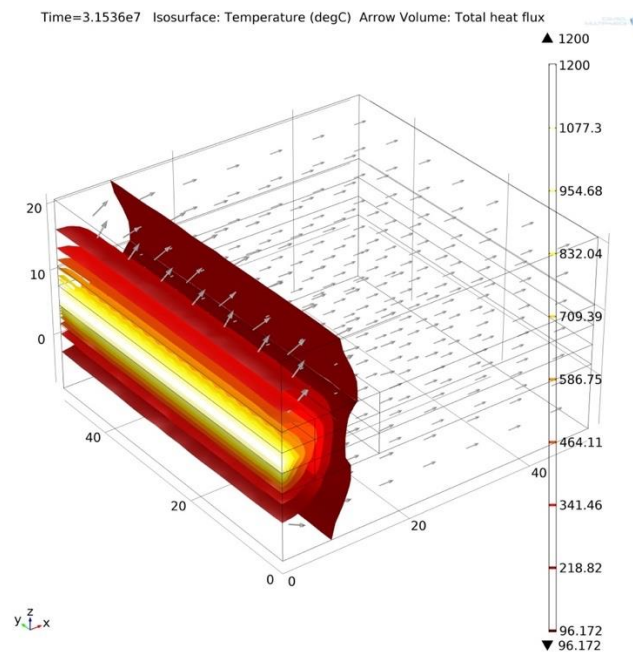
5.3.3 Simulación

Para proceder a la extinción y control de mega incendios en los mantos de carbón de la mina Cerrejón a través del sistema PROPEX, es necesario conocer en primera instancia como es la propagación del mismo para posteriormente definir las zonas de perforación y elaboración de pozos de inyección. Estos pozos se desarrollarán 5-10 metros en la horizontal más adelante del área de influencia del incendio plasmada en superficie, donde la temperatura interna del macizo es inferior a 180 °C. Se debe generar un fracturamiento en el manto sano para que la espuma trifásica pueda cubrir todo el carbón y generar condiciones que impidan la propagación del incendio. La inyección se realizará de forma continua cubriendo todas las grietas generadas por el fracturamiento inducido, sirviendo como

sellamiento. La espuma trifásica evita que se pueda seguir generando la transferencia de calor a través del manto posterior a la zona intervenida y contribuye a partir de la química de superficie con los componentes que conforman la espuma a extinguir el incendio.

En la Figura 5-13 se presenta el resultado de la simulación desarrollada en el software COMSOL, la cual se desarrolló con la finalidad de observar cómo impacta la aplicación de la espuma en el manto de carbón. A partir de esto se evidencia que la espuma trifásica sirve como barrera, disminuyendo la transferencia de calor en el medio, y a su vez de acuerdo con las características de los componentes que conforman la espuma se logra un sofocamiento del incendio. Por un lado, la arcilla depositada en las grietas al ser un material no combustible no favorece a la reacción de combustión e impide la difusión de oxígeno en el manto de carbón y, por otro lado, el nitrógeno al ser un gas inerte aísla el combustible dificultando la interacción con el oxígeno, el cual es desplazado. El agua sirve como medio de transporte de las partículas y también contribuye al enfriamiento.

Figura 5-13. Efecto de la transferencia de calor después de la aplicación del PROPEX.



Autor: elaboración propia con (COMSOL Inc., 1986)

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Las variables que inciden en la propagación de los incendios en paredes finales y tajos abandonados, se pueden clasificar en dos motores. El primero motor corresponde a los valores asociados al tipo de carbón del Cerrejón con sus propiedades químicas y termodinámicas, que se explican por medio de las ecuaciones constitutivas o de cambio para el fenómeno de propagación.

Según la termodinámica la reacción tanto de oxidación como de combustión son factibles en todos los rangos posibles de temperaturas por lo que se hace necesario estudiar la cinética como el factor determinante a la hora de estudiar la propagación de los incendios en los mantos de carbón, la velocidad de la reacción química para los carbones del Cerrejón tiene un valor aproximado entre 67.110 a $82.331 \text{ mol/m}^3 \cdot \text{s}$, por lo anterior, la reacción de combustión completa del carbón es de 23 días y la reacción de combustión incompleta es de 14 días, para 1,2 ton de carbón.

La reacción de combustión es espontánea y factible a temperaturas superiores de $180 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que se estudio por lo tanto fue la cinética. La producción monóxido de carbono (CO) es más espontánea a temperaturas superiores a $700 \text{ }^\circ\text{C}$, para temperaturas bajas es más factible la producción de dióxido de carbono (CO_2). El dióxido de carbono (CO_2) reacciona con el carbón a temperaturas superiores de $400 \text{ }^\circ\text{C}$ por lo que ayuda a que se produzca la propagación de los incendios en profundidad y superficie. En los incendios reales la producción de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y gas metano en simultánea es el escenario más común por eso se hace fundamental generar la tasa de consumo volumétrico de carbón en función de la temperatura. Por lo tanto, si el manto de carbón presenta un incendio con una temperatura de $200 \text{ }^\circ\text{C}$, la tasa de consumo de carbón es aproximadamente $200 \text{ cm}^3/\text{hora}$, mientras que, si el incendio presenta una temperatura de $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$, la tasa de consumo de carbón es aproximadamente $3.000 \text{ cm}^3/\text{hora}$.

El segundo motor corresponde a los factores relacionados a la actividad minera, las estructuras geológicas, los gases de combustión y la velocidad de los vientos. La actividad minera asociada a las voladuras realizadas en los tajos ayuda a fracturar el macizo, por la descarga energética hecha sobre las rocas, las estructuras geológicas producen movimientos de roca que ayudan al fracturamiento y los gases de combustión ayudan a abrir fracturas preexistentes por la expansión de los gases hacia superficie, todos estos factores producen un campo de velocidad de aire en el macizo rocoso, dicho campo es una expresión analítica o una interfaz de flujo de fluido. Para determinar los intervalos posibles de campos de velocidad se consideran estudios previos hechos en la mina,

ensayos de laboratorio y medidos a partir del software COMSOL. Para campos de velocidades altos con valores de 0,005 y 0,001 m/s, los diámetros característicos de las fracturas son alrededor de 149,59 y 747,98 micrómetros, respectivamente, asociando estos a fracturas de tipo fisuras, mientras que para campos de velocidades bajos con valores entre 0,0001 y 0,00007 m/s, los diámetros característicos tiene valores de 0,75 cm y 1,07 cm, respectivamente, teniendo a fracturas de tipo fisuras para las paredes finales y tajos abandonados. Los vientos por la adición de reactivo (O_2).

La transferencia de calor es más eficiente por conducción que por convección, ya que el aire tiene baja conductividad térmica, por lo tanto, si se tienen fisuras se promueve a la transferencia por conducción y si se tiene grietas se promueve la transferencia por convección, esto se demuestra en la velocidad de la propagación y en la los campos de velocidades registrados en las simulaciones en COMSOL y los ensayos hechos en el laboratorio , por que a mayor campo de velocidad mayor es la distancia a la cual se propaga el incendio.

Las propuestas técnicas para la extinción de los incendios en Cerrejón son la remoción con el sistema de aspersión de agua para mejorar el 20/20, la sofocación con material estéril con una granulometría optima y una humedad según los ensayos de compactación y el sistema PROPEX con todas sus consideraciones de instalación y montaje. Es de vital importancia los estudios previos en cada una de las etapas para tomar una decisión financiera en la compañía.

6.2 Recomendaciones

De los estudios hechos en campo y las conclusiones de la tesis se pueden hacer sugerencias para nuevas ideas de investigación con respecto a la propagación de los mantos de carbón, como se describen a continuación:

- Realizar una cartografía de zonas de clinker como un importante trazador de la propagación, para esclarecer de manera más veraz la longitud final y relacionarla con la geología del deposito
- Según las simulaciones de reacción química, estudiar el efecto de la convección y difusión en la combustión de carbón.
- Según las simulaciones de transferencia de calor, profundizar más en el estudio de la presión de los poros en el lecho poroso y los esfuerzos de superficie ejercidos por el avance de la reacción de combustión de carbón.

-
- Evaluar en campo si las ecuaciones de distancia suberificales son correctas mediante perforaciones de sondeo en las zonas de los mega incendios.
 - Probar químicos extintores en los frentes de remoción con el fin de evaluar la mejor alternativa para la extinción o enfriamiento de los incendios de la mina.
 - Hacer pruebas de sofocación en el laboratorio con valores escalados en magnitud como lo es en la realidad para así evaluar la efectividad de la propuesta tecnológica.
 - Como el PROPEX es una propuesta nueva a nivel mundial y solo se plantea una metodología como alcance de la tesis, se recomienda hacer estudios de suelos y diseños de pre factibilidad para llevar dicha propuesta a una realidad.

7. Bibliografía

Angel, S. O. L., & Herrera, C. (2004). CARTOGRAFIA DE LAS ZONAS DE “CLINKER” EN LAS ÁREAS DE MINERÍA DE LA MINA EL CERREJÓN. Albania, Guajira.

Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé C., M. (2006). *Geología y Geotecnia. Universidad Nacional de Rosario*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geolog?a+y+Geotecnia#4>

Autodesk Inc. (2017). AutoCAD. Retrieved from <https://latinoamerica.autodesk.com/>

Beamish, B. B., Barakat, M. A., & St. George, J. D. (2001). Spontaneous-combustion propensity of New Zealand coals underadiabatic conditions. *International Journal of Coal Geology*, 45(2–3), 217–224. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(00\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(00)00034-3)

Berranco Melendez, R. (2011). THE CHARACTERISATION AND COMBUSTION OF SOUTH AMERICAN COALS. UNIVERSITY OF NOTTINGHAM.

Blandón Montes, A. (2015). Notas de clase de Caracterización avanzada de Carbones. Medellín.

Bustamante Rúa, M. O. (2016). Notas de clase de Introducción de sistemas heterogéneos. Medellín.

Bustamante Rúa, M. O., Bustamante Baena, P., & Daza Aragón, A. J. (2017). Identificación de las principales causas y prevención de la combustión espontánea de carbón en los mantos de la mina Cerrejón. Universidad Nacional de Colombia.

Carras, J. N., & Young, B. C. (1994). Self-heating of coal and related materials: Models, application and test methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 20(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0360-1285(94)90004-3)

Cerrejón. (2016a). CERREJÓN Minería Responsable | Página de inicio. Retrieved January 8, 2017, from <http://www.cerrejon.com/site/>

Cerrejón. (2016b). Procedimiento de control de incendio.

Chen, Y., Mastalerz, M., & Schimmelmann, A. (2012). Characterization of chemical functional groups in macerals across different coal ranks via micro-FTIR spectroscopy. *International Journal of Coal Geology*, 104, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.09.001>

COMSOL Inc. (1986). COMSOL Multyphysics. United States.

Cort, V. J. (1978). Prof. Dr. Vicente J. Cortés 1. *Carbón*, 1–47.

Courant, R. (1943). Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of the American Mathematical Society USA*, p. 13.

Dalverny, Louis E., & Chaiken, R. F. (1991). Mine Fire Diagnostics and Implementation of Water Injection With Fume Exhaustion at Renton, PA. Pennsylvania.

Departamento de Geología. Paleoincendios en la mina Cerrejón (2017).

Díaz, E., Fernández, J., Ordóñez, S., Canto, N., & González, A. (2012). Carbon and ecological footprints as tools for evaluating the environmental impact of coal mine ventilation air. *Ecological Indicators*, 18, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.009>

Dodamani, S. (2014). Controlling spontaneous combustion of coal by pyro-seizure method using brine freezing process and low temperature CO₂ injection Shankar Dodamani. *Journal of Applied Chemistry*, 51–53. Retrieved from www.iosrjournals.org

Fierro, V., Miranda, J. L., Romero, C., Andres, J. M., Arriaga, A., Schmal, D., & Visser, G. H. (1999). Prevention of spontaneous combustion in coal stockpiles Experimental results in coal storage yard, 23–34.

Finkelman, R. B. (2004). Potential health impacts of burning coal beds and waste banks. *International Journal of Coal Geology*, 59(1–2), 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2003.11.002>

Gangopadhyay, P. K., & Lahiri-Dutt, K. (2005). Detecting Coalfires with Remote Sensing: A Comparative Study of Selected Countries. *Resource Management in Asia-Pacific Program*, 17.

Gómez Rojas, O. P., Carmona Lopez, I., & Bustamante Rúa, M. O. (2007). ANALYSIS OF LIBERATION OF THE GROUPS OF MACERALES OF THE COAL: COLOMBIAN COALS. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 21, 14.

Guerrero, N., López, D., & García, P. (2008). Reactividad Y El Desarrollo De Área Superficial En La Activación. *Revista Prospectiva*, 42–48.

Gupta, V., Sun, X., Xu, W., Sarv, H., & Farzan, H. (2016). A discrete element method (DEM) based framework to predict the breakage of coal. *International Journal of Mineral Processing*, 28(10), 2665–2677. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.07.019>

Heffern, E. L., & Coates, D. A. (2004). Geologic history of natural coal-bed fires, Powder River basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, 59(1–2), 25–47. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2003.07.002>

Hernández Wong, J. (2013). Análisis de la Transferencia de Calor Mediante la Técnica Hot Wire y COMSOL Multiphysics. Instituto Politécnico Nacional.

Huo, H., Ni, Z., Gao, C., Zhao, E., Zhang, Y., Lian, Y., ... Cui, T. (2015). A study of coal fire propagation with remotely sensed thermal infrared data. *Remote Sensing*, 7(3), 3088–3113. <https://doi.org/10.3390/rs70303088>

Huw, P., Sezer, U., & Kelello, C. (2009). *Prevention and Control of Spontaneous Combustion*. Johannesburg. Retrieved from [http://www.coaltech.co.za/chamber_databases/coaltech/Com_DocMan.nsf/0/AAB37D3149EC72FE42257839002F59BB/\\$File/Spontaneous Combustion Guidelines - Feb 2011.pdf](http://www.coaltech.co.za/chamber_databases/coaltech/Com_DocMan.nsf/0/AAB37D3149EC72FE42257839002F59BB/$File/Spontaneous%20Combustion%20Guidelines%20-%20Feb%202011.pdf)

Instituto de minerales CIMEX. (2015). PRACTICA #1 LABORATORIO ANALISIS GRANULOMÉTRICO DE MINERALES. Medellín, Colombia.

Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (2015). *Manual de Perforación y Voladuras en rocas*. Madrid, España.

Inzunza R, J. (2002). Mecanismos De Transferencia De Calor. *Física: Introducción a La Mecánica*, 407–427.

Jing, S., Hong-qing, Z. H. U., & Zhen, Z. (2016). Thermal technology Experiment analysis of relationship between oxygen concentration and coal oxidation characteristics Thermal technology. In *5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP), 4-6 August 2015* (pp. 617–622).

Kaymakçi, E., & Didari, V. (2002). Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26(1), 59–64. [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(03\)90480-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(03)90480-2)

Kim, A. G. (2011). *Coal Formation and the Origin of Coal Fires*. *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52858-2.00001-3>

Kim, A. G., & Chaiken, R. F. (1993). Fires in abandoned coal mines and waste banks.

Kuenzer, C., & Stracher, G. B. (2012). Geomorphology of coal seam fires. *Geomorphology*, *138*(1), 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.09.004>

Kuenzer, C., Zhang, J., Li, J., Voigt, S., Mehl, H., & Wagner, W. (2007). Detecting unknown coal fires: Synergy of automated coal fire risk area delineation and improved thermal anomaly extraction. *International Journal of Remote Sensing*, *28*(20), 4561–4585. <https://doi.org/10.1080/01431160701250432>

Kumar, H., Deb, D., & Chakravarty, D. (2017). Design of crown pillar thickness using finite element method and multivariate regression analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.017>

Kyser, D., & Ravichandran, N. (2016). Properties of chipped rubber roofing membrane and sand mixtures for civil engineering applications. *Journal of Building Engineering*, *7*, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.05.008>

Lasseux, D., & Valdés-Parada, F. J. (2017). On the developments of Darcy's law to include inertial and slip effects. *Comptes Rendus - Mécanique*, *345*(9), 660–669. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.06.005>

Levenspiel, O. (1986). *Ingeniería de las reacciones químicas*.

Levenspiel, O. (2012). *Ingeniería de las reacciones químicas*. (S. . REVERTÉ, Ed.) (6th ed.). Barcelona.

Liu, Z., Cheng, Y., Liu, Q., Jiang, J., Li, W., & Zhang, K. (2017). Numerical assessment of CMM drainage in the remote unloaded coal body: Insights of geostress-relief gas migration and coal permeability. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *45*, 487–501. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.06.017>

Lu, W., Cao, Y.-J., & Tien, J. C. (2017). Method for prevention and control of spontaneous combustion of coal seam and its application in mining field. *International Journal of Mining Science and Technology*, *27*(5), 839–846. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.018>

Lu, X., Wang, D., Qin, B., Tian, F., Shi, G., & Dong, S. (2015). Novel approach for extinguishing large-scale coal fires using gas-liquid foams in open pit mines. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*(23), 18363–18371. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5385-7>

Manger, E. G. (1963). Porosity and Bulk Density of Sedimentary Rocks. *Geological Survey Bulletin 1144-E*, 62.

Melody, S. M., & Johnston, F. H. (2015). Coal mine fires and human health: What do we know? *International Journal of Coal Geology*, 152, 1–14.

Mendoza Daza, A. D. (2009). Prevencion y control de autocombustion del carbon in situ en la mina carbones del Cerrejon. Medellin.

Miah, M. I. (2014). Porosity assessment of gas reservoir using wireline log data: A case study of bokabil formation, Bangladesh. *Procedia Engineering*, 90, 663–668. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.789>

Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW. (2011). Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline. New South Wales.

Moxon, N. T., & Richardson, S. B. (1985). Development of a self-heating index for coal. *Coal Preparation*.

Nelson, P. H. (1994). Permeability-porosity relationships in sedimentary rocks. *The Log Analyst*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Permeability-Porosity+Relationships+in+Sedimentary+Rocks#0%5Cnhttp://www.onepetro.org/mslib/app/Preview.do?paperNumber=SPWLA-1994-v35n3a4&societyCode=SPWLA>

Nield, D. A., & Bejan, A. (2013). Convection in porous media. *Convection in Porous Media*, 1–778. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5541-7>

Nordon, P., Young, B. C., & Bainbridge, N. W. (1979). The rate of oxidation of char and coal in relation to their tendency to self-heat. *Fuel*, 58(6), 443–449. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(79\)90086-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(79)90086-3)

Nunes, K. G. P., & Marcilio, N. R. (2015). Determination of the kinetic parameters of Oxy-fuel combustion of coal with a high ash content. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(1), 211–223. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150321s00003142>

OriginLab Corporation. (1992). OriginLab. Massachusetts.

OUTOKUMPU Technology. (2006). HSC Chemistry.

Pone, J. D. N., Hein, K. A. A., Stracher, G. B., Annegarn, H. J., Finkleman, R. B., Blake, D. R., ... Schroeder, P. (2007). The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and

Sasolburg coalfields of South Africa. *International Journal of Coal Geology*, 72(2), 124–140. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.01.001>

Quintero, J. A., Candela, S. A., Ríos, C. A., Montes, C., & Uribe, C. (2009a). Spontaneous combustion of the Upper Paleocene Cerrejón Formation coal and generation of clinker in La Guajira Peninsula (Caribbean Region of Colombia). *International Journal of Coal Geology*, 80(3–4), 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.09.004>

Quintero, J. A., Candela, S. A., Ríos, C. A., Montes, C., & Uribe, C. (2009b). Spontaneous combustion of the Upper Paleocene Cerrejón Formation coal and generation of clinker in La Guajira Peninsula (Caribbean Region of Colombia). *International Journal of Coal Geology*, 80(3–4), 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.09.004>

Ren, W., Shi, J., Guo, Q., Zhao, Q., & Bai, L. (2017). The influence of dust particles on the stability of foam used as dust control in underground coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 740–746. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.043>

Roslin, A., & Esterle, J. S. (2016). Electrofacies analysis for coal lithotype profiling based on high-resolution wireline log data. *Computers and Geosciences*, 91, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.03.006>

Schmal, D., Duyzer, J. H., & van Heuven, J. W. (1985). A model for the spontaneous of coal. *Fuel*, 64, 963–972.

Scott, G. S. (1994). ANTRACITE MINE FIRES: THEIR BEHAVIOR AND CONTROL. Washinton: US BUREAU OF MINES.

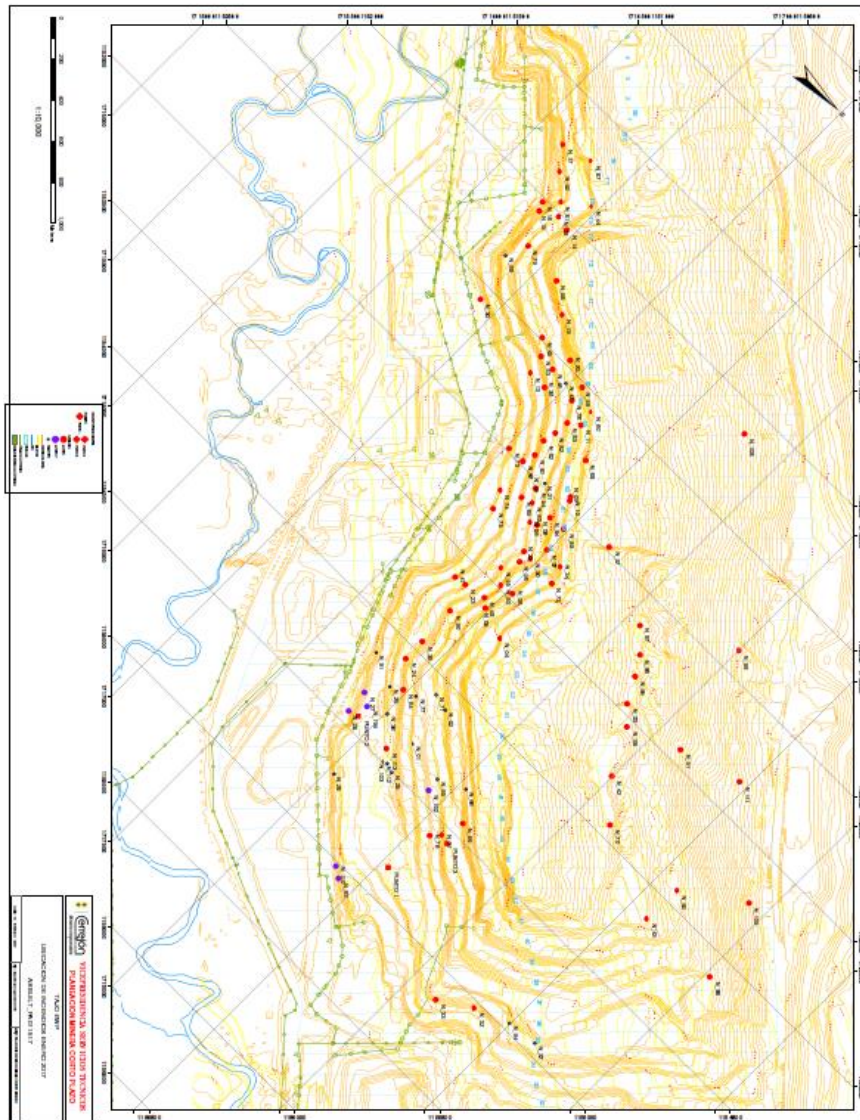
Singh, P. (2014). An Investigation into Spontaneous Heating Characteristics of Coal and its Correlation with Intrinsic Properties An Investigation into Spontaneous Heating Characteristics of Coal and its Correlation with Intrinsic Properties. Rourkela.

Singh, R. V. K. (2013). Spontaneous heating and fire in coal mines. *Procedia Engineering*, 62, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.046>

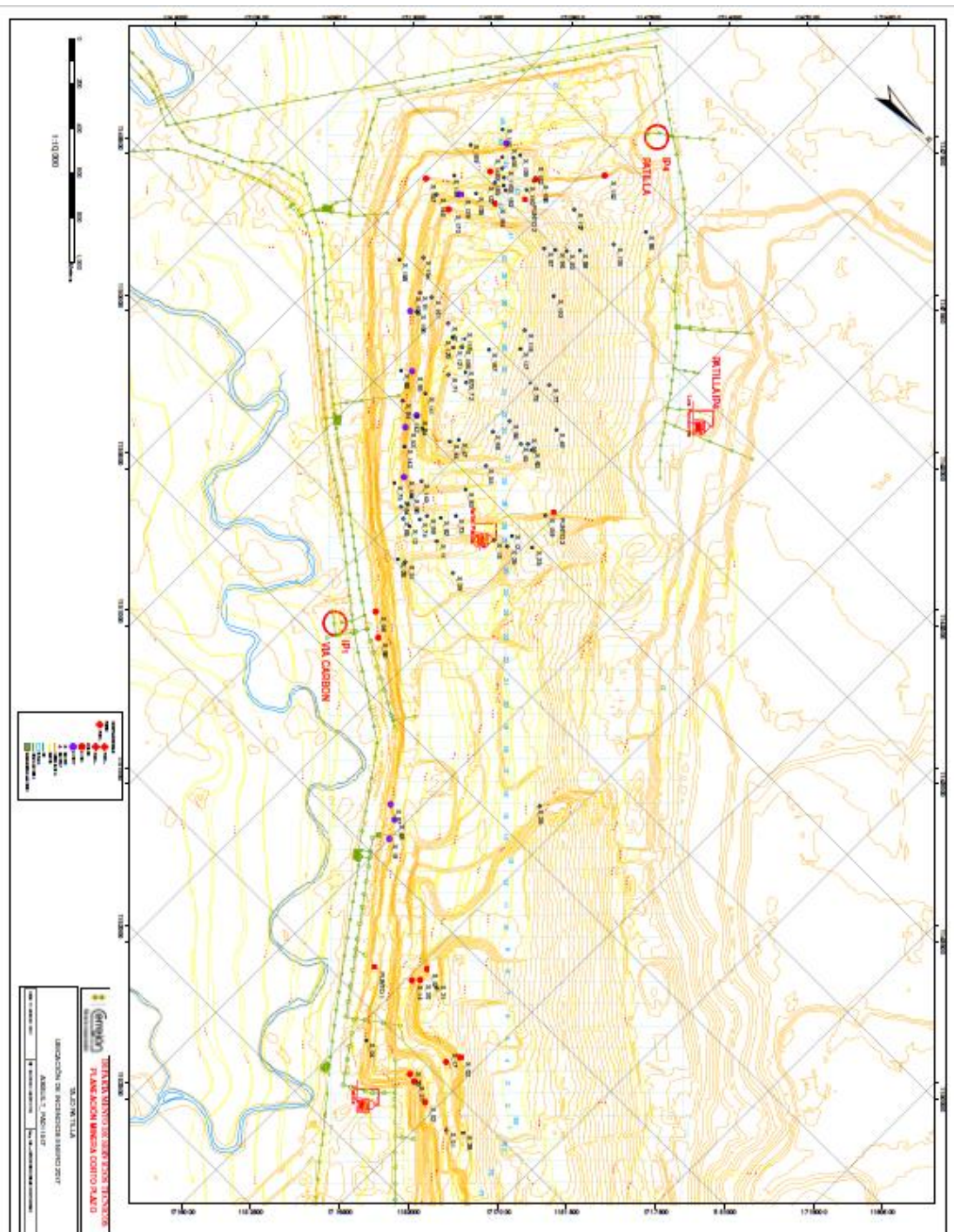
Smith, K. L., Smoot, L. D., & Fletcher, T. H. (1993). Coal Characteristics, structure, and reaction rates. In: Fundamentals of coal combustion for clean and efficient use. (L. D. Smoot, Ed.). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

-
- Smoot, L. D. (1993). Fundamentals of coal combustion for clear and efficient use. *Coal Science and Thechnology*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Song, Z. ., Zhu, H., Tan, B., Wang, H. Y., & Qin, X. F. (2014). Numerical study on effects of air leakages from abandoned galleries on hill-side coal fires. *Fire Safety*.
- Tanveer, A., Hayat, T., Alsaedi, A., & Ahmad, B. (2017). On modified Darcy's law utilization in peristalsis of Sisko fluid. *Journal of Molecular Liquids*, 236, 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.04.041>
- Timko, B. R. J., & Derick, R. L. (1995). Detection and Control of Spontaneous Heating in Coal Mine Pillars — A Case Study.
- Viswanathan, B., & Viswanathan, B. (2017). Chapter 4 – Coal. In *Energy Sources* (pp. 81–111). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56353-8.00004-6>
- Wan-Xing, R., Zeng-Hui, K., & De-Ming, W. (2011). Procedia Engineering Causes of Spontaneous Combustion of Coal and Its Prevention Technology in The Tunnel Fall of Ground of Extra-thick Coal Seam. *Procedia Engineering*, 26, 717–724. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2228>
- Wang, J., Chen, H., Yang, H., & Zhang, S. (2011). Kinetic characteristics of coal char combustion in oxygen-enriched environment. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5747672>
- Warren M, R., James P, H., & Young I, C. (2008). *Handbook of Heat Transfer Calculations* (MCGRAW-HIL, Vol. 99). New York San Francisco Washington, D.C. Auckland Bogota Caracas Lisbon London Madrid Mexico City Milan Montreal New Delhi San Juan Singapore Sydney Tokyo Toronto.
- World Coal Institute. (2016). *Coal, power for progress*. (WCI, Ed.) (4th ed.). London.
- Wu, D., Norman, F., Schmidt, M., Vanierschot, M., Verplaetsen, F., Berghmans, J., & Van den Bulck, E. (2017). Numerical investigation on the self-ignition behaviour of coal dust accumulations: The roles of oxygen, diluent gas and dust volume. *Fuel*, 188, 500–510. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.063>

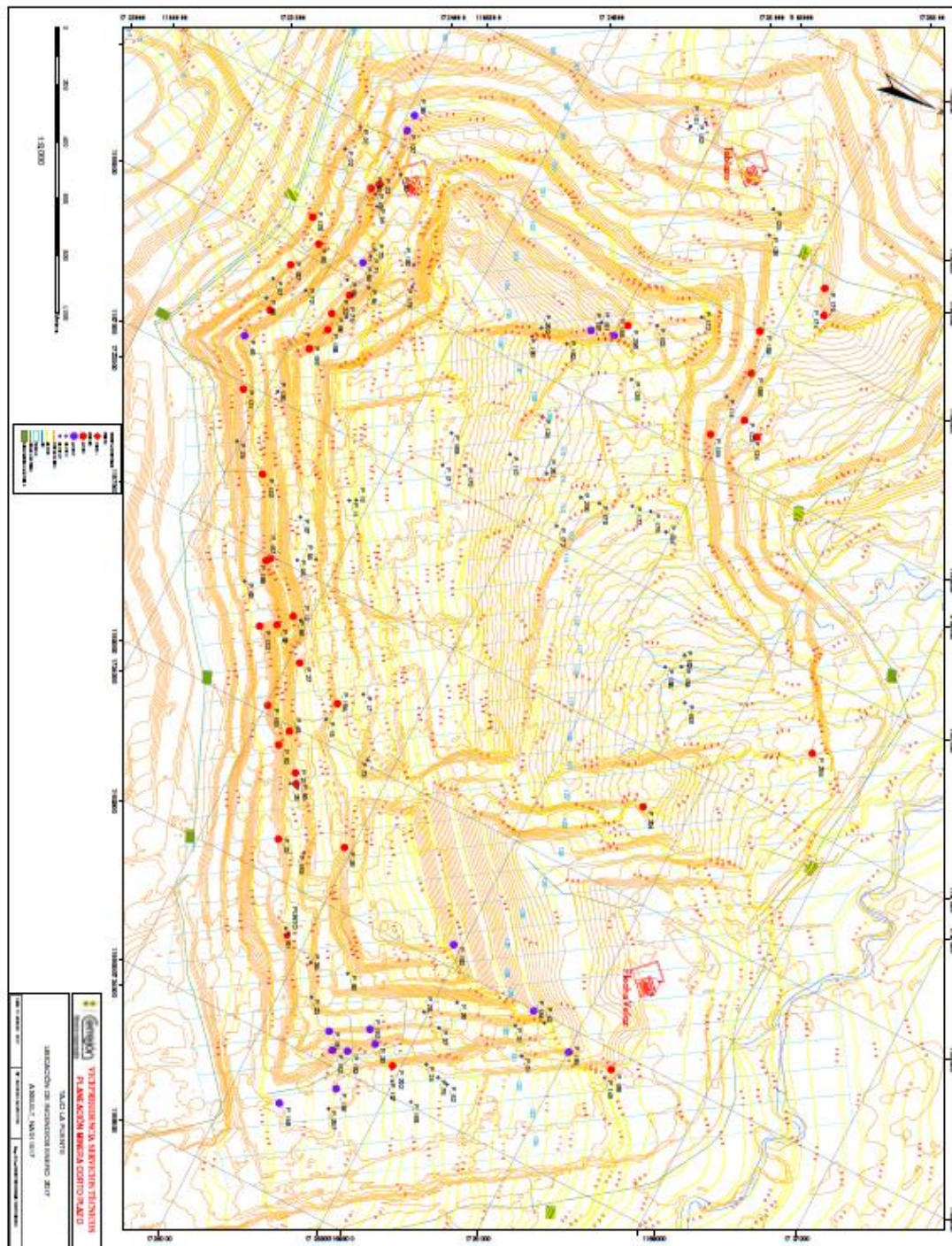
8. Anexo 1. Planos de los tajos de la mina Cerrejón con los incendios en 2016



Plano de EWP con puntos de muestreo.

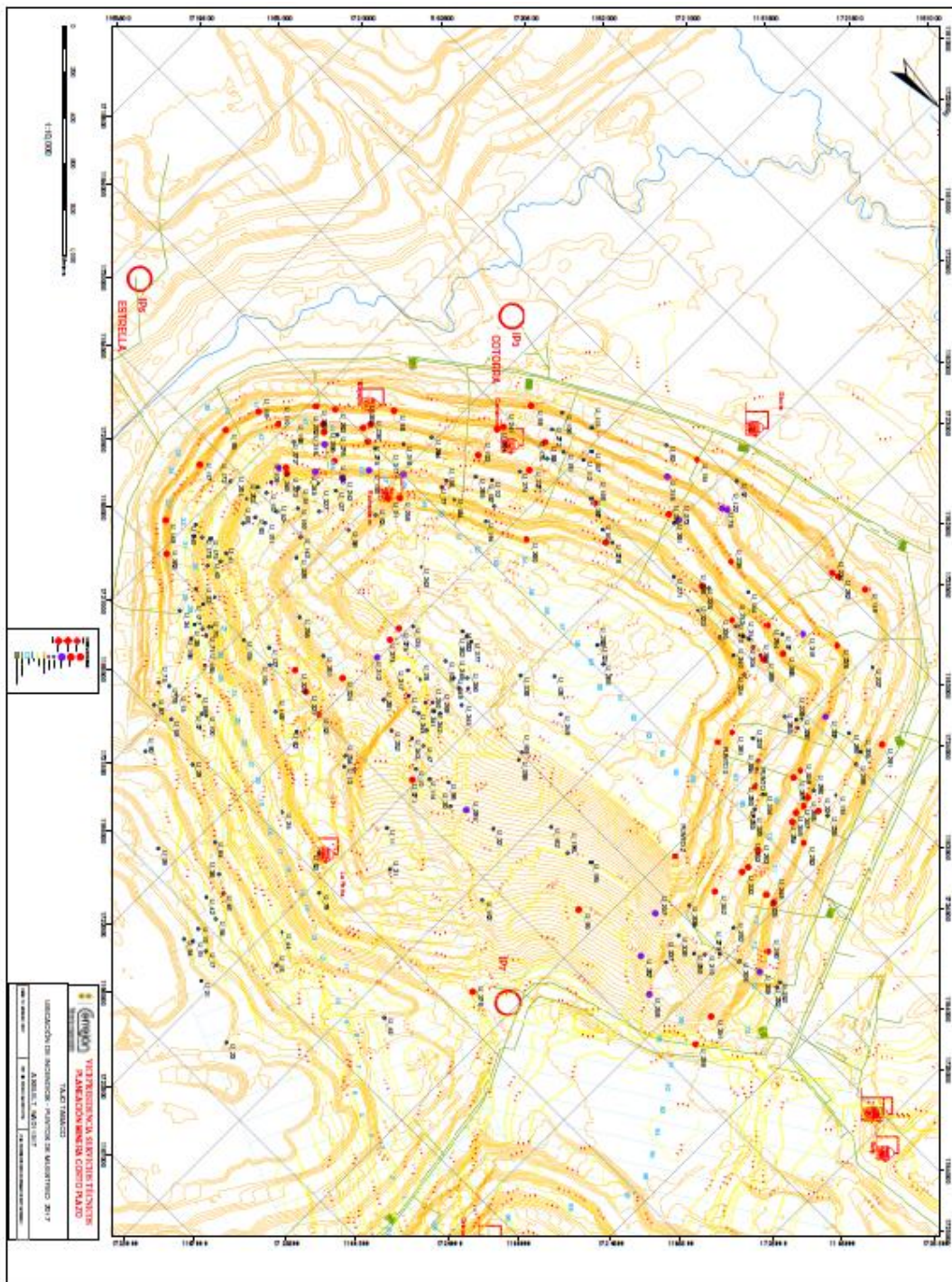


Plano de Patilla con puntos de muestreo.

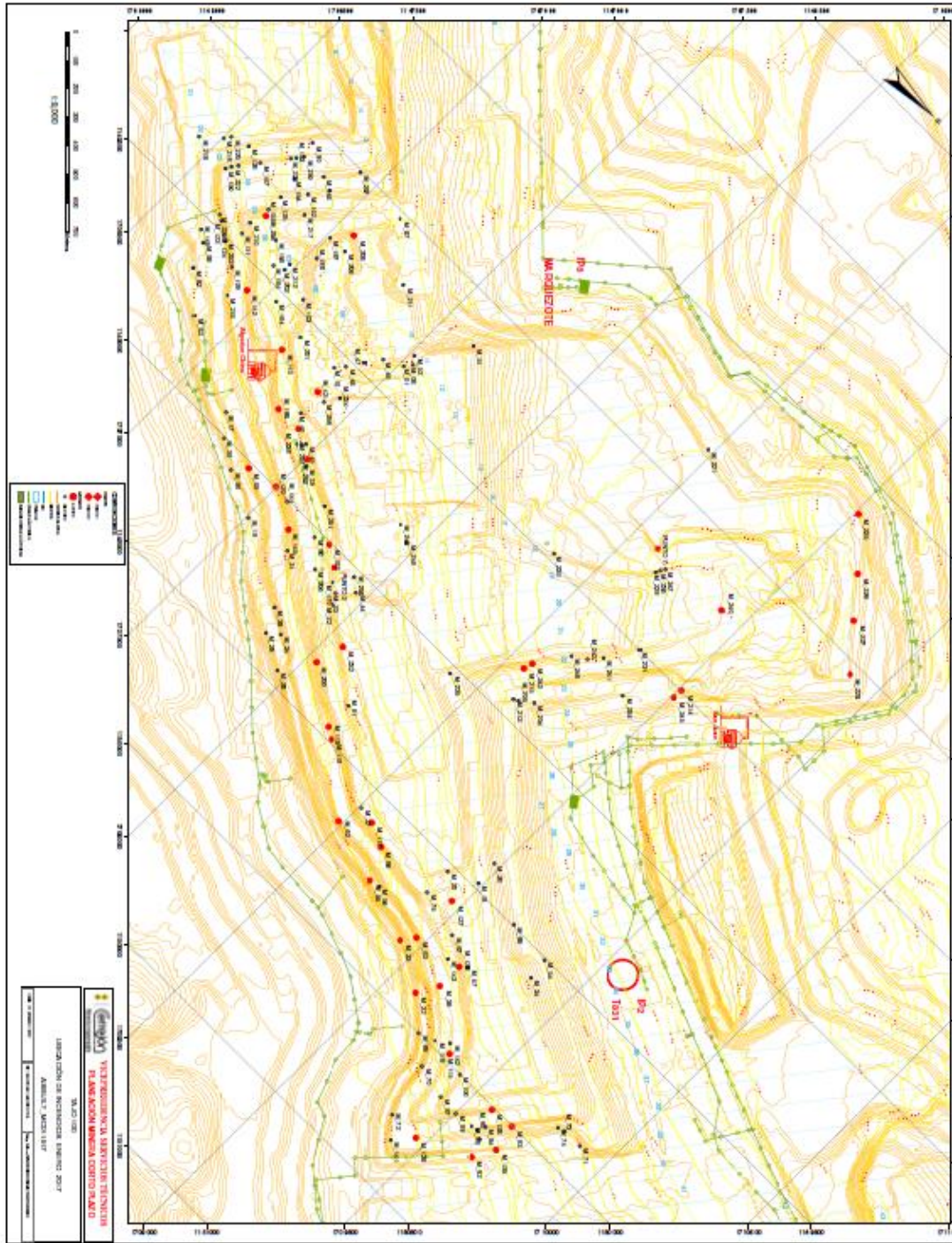


Plano de La Puente con puntos de muestreo.

130 Determinación y simulación de factores involucrados en la explotación de carbón que promueven la propagación de incendios en los tajos en la mina Cerrejón



Plano de Tabaco con puntos de muestreo.



Plano de Tajo 100 con puntos de muestreo.













9. Anexo 2. COMSOL Multiphysics

COMSOL multiphysics fue fundada por estudiantes de posgrado (Svante Littmarck y Farhad Saeidi) del Profesor Germund Dahlquist basado en códigos desarrollados para un curso de posgrado en el Real Instituto de Tecnología en Estocolmo, Suecia (Hernández Wong, 2013).

Las primeras versiones de COMSOL multiphysics fueron llamadas FEMLAB y su kernel fue programado en el paquete matemático computacional Matlab y solo incluía la capacidad del análisis estructural. Con el desarrollo de la plataforma se fueron incluyendo más módulos de análisis, los cuales fueron aumentando las prestaciones del paquete pero fue hasta la versión 3.0 (Noviembre de 2003) (COMSOL Inc., 1986) que el programa dio un giro reescribiendo el kernel en C++, así al no depender de Matlab, el kernel de FEMLAB pudo utilizarse como servidor de computadora. Con el lanzamiento de versiones subsecuentes FEMLAB fue integrando más prestaciones a su interfaz, hasta que en el 2005 [10] fue anunciado que FEMLAB sería llamado COMSOL, el cual integro una nueva herramienta llamada SCRIPT que da al usuario el poder de escribir funciones definidas por él, relacionadas a sus propios modelos. Además, COMSOL multiphysics a diferencia de los programas convencionales de análisis físico permite el acoplamiento de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, abreviadas como PDEs por su nombre en inglés: Partial Differential Equations. Las PDEs pueden ser introducidas directamente o usando la llamada forma débil (Hernández Wong, 2013).


Los módulos que el COMSOL multiphysics integra en su estructura son los que se muestran en la Figura 9-1. Con los que se utilizaran el módulo de Transferencia de calor y Transportes de especies químicas para el desarrollo de esta tesis.

Figura 9-1. Módulos de COMSOL multyphiscs.

- ▷  AC/DC
- ▷  Acoustics
- ▷  Chemical Species Transport
- ▷  Electrochemistry
- ▷  Fluid Flow
- ▷  Heat Transfer
- ▷  Optics
- ▷  Plasma
- ▷  Radio Frequency
- ▷  Structural Mechanics
- ▷  Semiconductor
- ▷  Δu Mathematics

Autor: (COMSOL Inc., 1986)

10. Anexo 3. Proctor

 UNIVERSIDAD DE MAGALLANES	<h2 style="margin: 0;">COMPACTACIÓN</h2> <p style="margin: 0;">DATOS TOMADOS DEL FORMATO FT-32</p>
---	--

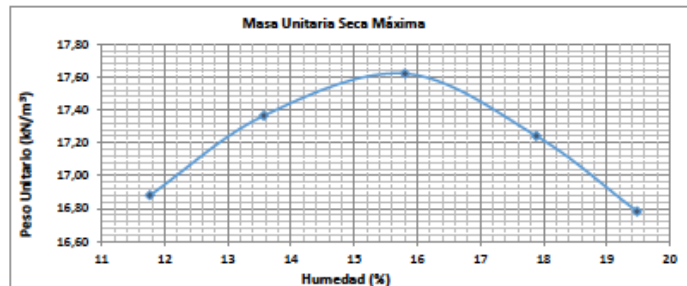
Código Muestra: 17-MS-51-12 Fecha: 2017-10-24 Norma/Versión: INV E-141 / 2013
 Descripción muestra: SC-AP. Suelo finogranular de color café crema, con motas de color blanco y negro, con plasticidad media y consistencia firme.

Especificaciones del Ensayo					
Tipo de ensayo:	Normal	SI	Modificado	NO	Método Empleado: A
Número de capas:	3			Nº de golpes:	25
Masa Inicial muestra húmeda (g)	17658,5	Masa muestra seca (g)		17584,1	Tara Nº 10
Masa seca retenido 3/4" (g)	0,00	Retenido 3/4" (%)		N/A	Masa tara (g) 36,48
Masa seca retenido 3/8" (g)	0,00	Retenido 3/8" (%)		N/A	Masa tara+suelo húmedo (g) 436,25
Masa seca retenido #4 (g)	0,00	Retenido # 4 (%)		N/A	Masa tara+suelo seco (g) 420,03 420,03
Masa seca pasante #4 (g)	17584,1	Si la muestra de ensayo contiene menos del 5% de fracción gruesa el material se puede descartar, de lo contrario consultar la norma.			Humedad (%) 4,23

Datos iniciales para el ensayo					
Humedad inicial de la muestra (%)	4,23	4,23	4,23	4,23	4,23
Humedad deseada (%)	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00
Humedad a adicionar (%)	7,77	9,77	11,77	13,77	15,8
Masa muestra de embolsamiento (g)	2550,12	2633,21	2798,95	2714,12	2889,06
Masa muestra seca (g)	2446,63	2526,35	2685,36	2603,97	2771,81
Agua a adicionar (ml)	190,10	246,82	316,07	358,57	437,11

Datos del Molde					
Molde No	16	16	16	16	16
Masa del molde (kg)	4,2617	4,2617	4,2617	4,2617	4,2617
Volumen del molde (m ³)	0,0009402	0,0009402	0,0009402	0,0009402	0,0009402

Datos del ensayo					
Masa muestra húmeda + molde (kg)	6,0705	6,1523	6,2180	6,2103	6,1842
Masa de la muestra húmeda (kg)	1,809	1,891	1,956	1,949	1,923
Masa de la muestra Seca (kg)	1,6184	1,6647	1,6893	1,6529	1,6090
Tara No	401	408	402	10	T33
Masa de tara (g)	38,81	45,17	45,38	36,51	128,28
Masa tara + suelo húmedo (g)	375,58	564,82	479,39	410,00	450,43
Masa tara+suelo seco (g) Pesar a intervalos = 30 minutos hasta que el cambio sea < 0,1%	340,13 340,13	502,74 502,74	420,15 420,15	353,33 353,33	397,90 397,90
Contenido de humedad (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Peso unitario húmedo (kg/m ³)	11,76	13,57	15,81	17,89	19,48
Peso unitario seco (kg/m ³) - (kN/m ³)	1924	2011	2081	2073	2044,8
	1721 16,88	1771 17,36	1797 17,62	1758 17,24	1711 16,78



Humedad Óptima 15,7% Peso Unitario Seco Máximo 1796,7 (kg/m³) 17,62 (kN/m³)

Observaciones: N/A

Equipo Empleado: Balanza OHAUS 37064-32683, Horno BINDER 37059, Molde Proctor 11055-16, Martillo LM043,

Pie de rey 32905, juego de tamices calibrados.

Ejecutó: William Tobón Calculó: William Tobón Revisó: Manuel Seguro